

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)	2. REPORT DATE	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED	
	1999	Dissertation	
4. TITLE AND SUBTITLE Lebensdauerabschaetzung von Loetverbindungen oberflaechenmontierter Bauteile bei thermischer Wechselbeanspruchung unter Beruecksichtigung der Bedeutung elastischer, plastischer und Kreichdehnungsanteile Longevity of Taft Joints of Superficially Mounted Construction Parts in Thermally Alternating Stress with regard to the Significance of Elastic, Plastic and Creep Parts			5. FUNDING NUMBERS
6. AUTHOR(S) Andreas Warnke			
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) Fachbereich Elektrotechnik Universitaet der Bundeswehr Muenchen			
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER
11. SUPPLEMENTARY NOTES Text in German. Title and abstract in German and English, 154 pages.			
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Distribution A: Public Release.		12b. DISTRIBUTION CODE	
ABSTRACT (Maximum 200 words) The goal of this study is the refinement of the technique of low-frequency fatigue analyses of a Taft joint through computer simulation, in order to obtain, in the shortest time possible, a more precise expression of their longevity. To answer the central query, "how long does the Taft joint hold?", there exists a series of concomitant questions, around which the study centers: on what kind of Taft joint longevity can one count; how are the Taft joint data dependent on mechanical tension, time, and temperature; which conditions promote the ideal results; what must be taken into account during the cross-linkage of the Taft joint for finite element analysis; which temperature should be chosen in order to re-portray the thermocycles in a low-frequency fatigue analysis; which temperature should be chosen in order to re-portray the thermocycles in a low-frequency fatigue analysis as realistically as possible; locating the critical geometric places within the Taft joint.			
14. SUBJECT TERMS German, Taft joints, Fatigue analysis, Finite element analysis		15. NUMBER OF PAGES	
		16. PRICE CODE	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT UNLIMITED

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)
Prescribed by ANSI Std. Z39-18
298-102

20021119 033

Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen
oberflächenmontierter Bauteile
bei thermischer Wechselbeanspruchung
unter Berücksichtigung der Bedeutung
elastischer, plastischer und Kriechdehnungsanteile

Vom Fachbereich Elektrotechnik
der Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor - Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Mathematiker Andreas W A R N K E
aus Hamburg

Hamburg 1999

**Reproduced From
Best Available Copy**

**Copies Furnished to DTIC
Reproduced From
Bound Originals**

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Schomburg
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Morgenstern

Tag der mündlichen Prüfung: 26.03.1999

Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen
oberflächenmontierter Bauteile
bei thermischer Wechselbeanspruchung
unter Berücksichtigung der Bedeutung
elastischer, plastischer und Kriechdehnungsanteile

Vom Fachbereich Elektrotechnik
der Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor - Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Mathematiker Andreas W A R N K E
aus Hamburg

Hamburg 1999

AQ F03-02-0233

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Mechanik an der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Für die großzügige Förderung und Anregung bin ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Schomburg zu Dank verpflichtet.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Schomburg für die Übernahme des Referats und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Morgenstern, Professur für Elektronik und Nachrichtenverarbeitung an der Universität der Bundeswehr Hamburg, für das Korreferat.

Des weiteren danke ich Herrn Dr. Th. Ahrens vom Centrum für Mikroelektronik Anwendungen, Neumünster, für die durch ihn gewonnenen Einblicke in die Metallographie sowie für die Anfertigung von Schliffbildern, die die Modellierung einer realen Lötverbindung erst möglich gemacht haben.

Danken möchte ich auch meiner Frau Claudia für das verständnisvolle Interesse. Ohne Sie wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Die Innovationszyklen in der Elektronikindustrie werden heute immer kürzer. Daher muß die Frage nach der Lebensdauer neuer Baugruppen oder Geräte immer rascher beantwortet werden. Die Lebensdauer hängt stark von der verwendeten Aufbau- und Verbindungs-technik ab. Eine der gängigen Methoden zur mechanischen und elektrischen Verbindung ist die Verwendung von Lötverbindungen. Daraus ergibt sich, daß im wesentlichen die Lebensdauer von Lötverbindungen zu untersuchen ist. In dieser Arbeit wurden speziell Lötverbindungen elektronischer Bauelemente in Oberflächenmontagetechnik analysiert.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, um die Frage nach der Lebensdauer von Lötverbindungen schneller und präziser beantworten zu können. Das Verfahren basiert auf einer Finite-Element-Simulation sowie einer hieraus ableitbaren Identifizierung der geometrischen Orte maximaler Ermüdungsschädigung. Sich an die Simulation anschließende Experimente zur Eichung der Simulationsergebnisse erlauben sowohl eine Präzisierung als auch eine beschleunigte Beantwortung der Frage nach der Lebensdauer einer Lötverbin-dung, falls genauere Materialmodelle zur Ermüdung vorliegen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Materialkennwerte und Geometrie der Lötverbindung	7
2.1 Festsetzung des zu untersuchenden Temperaturbereichs	7
2.2 Experimentelle Ermittlung der Materialkennwerte des ternären Weichlotes Sn62Pb36Ag2	8
2.2.1 Vorbereitung der Proben	9
2.2.2 Elastische und plastische Materialkennwerte	10
2.2.3 Kriechkennwerte	11
2.3 Geometrie der Lötverbindung	12
2.4 Materialkennwerte von Keramik, Silber, Nickel, Kupfer und Leiterplatte	14
3 Überblick über das Vorgehen bei der Finite-Element-Analyse der Lötverbindung	15
3.1 Schematisierte Darstellung der Lötverbindung	15
3.2 Vereinfachte Betrachtung der Lötverbindung als Doppel-Thermobimetall	16
3.3 2- und 3-D Simulationen an Modell-Lötverbindungen	18
3.4 2-D Simulation realer Lötverbindungen	18
3.5 Unterteilung der Gesamtdehnung	19
3.6 Simulationswerkzeuge	20
4 Mathematische Modellierung der Materialgesetze	20
4.1 Verwendete Materialgesetze zur Modellierung des Verhaltens von PCB, Cu, Ni, Ag und SMC.	20
4.2 Mathematische Modellierung des Lotmaterialverhaltens	20
5 Thermisches Belastungsprofil I: Temperaturanstieg	24
5.1 Beschreibung des Temperaturanstiegs	24
5.2 Geometrie der Lötverbindung und Verschiebungsrandbedingungen	25

5.3	Verwendete Elementtypen	26
5.4	Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung	27
5.5	Simulationsergebnisse	29
5.5.1	Die thermischen Dehnungen	30
5.5.2	Die Spannungen	32
5.5.3	Die elastischen Dehnungen	40
5.5.4	Die plastischen Dehnungen	47
5.5.5	Die Kriechdehnungen	50
5.5.6	Bewertung und Schlußfolgerungen	55
6	Thermisches Belastungsprofil II: Temperaturzyklus	58
6.1	Beschreibung der zyklischen Temperaturwechsel	58
6.2	Geometrie der Lötverbindung und Verschiebungsrandbedingungen	60
6.3	Verwendete Elementtypen	61
6.4	Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung	61
6.5	Simulationsergebnisse	64
6.5.1	Die thermischen Dehnungen	65
6.5.2	Die elastischen Dehnungen	67
6.5.3	Die plastischen Dehnungen	84
6.5.4	Die Kriechdehnungen	100
6.5.5	Zusammenfassung, Bewertung und Schlußfolgerungen	128
7	Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen elektronischer Bau- teile	131
7.1	Zuverlässigkeit	131
7.2	Ausfallrate	132
7.3	Ausfall von Lötverbindungen	133
7.3.1	Ausfallmechanismen	133

7.3.2 Ausfallursachen	134
7.3.3 Umweltbedingungen	134
7.4 Auswahlkriterien für elektronische Bauteile	135
7.4.1 Gehäusetyp	135
7.5 Experimentell bestimmte Ausfallrate typischer SM-Komponenten und -Lötverbindungen	136
7.6 Berechnung der Ausfallrate von SM-Komponenten und -Lötverbindungen .	137
7.7 Modelle zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen oberflächenmontierter Lötverbindungen	137
7.7.1 Coffin-Manson-Modell nach Engelmaier	138
7.7.2 Coffin-Manson-Modell nach Morrow	138
7.7.3 Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile	140
8 Diskussion	142
9 Zusammenfassung	146
10 Ausblick	147
11 Anhang	i
12 Lebenslauf	6

Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen

Ag Chemisches Formelzeichen für Silber, bzw. geometrischer Bereich, der aus Silbermaterial besteht

α_T Temperaturoausdehnungskoeffizient, Dehnungsänderung je Temperatureinheit, Einheit $10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Cu Chemisches Formelzeichen für Kupfer

d Korngröße z.B. eines Metalls

Δl Längenänderung (mm)

DIN Deutsche Industrie Norm

E Elastizitätsmodul, Maß für mechanische Festigkeit, Einheit: Nmm^{-2} bzw. GPa

ε Mechanische Dehnung, Längenänderung bezogen auf die Ausgangslänge, dimensionslos

$\dot{\varepsilon}$ Kriechgeschwindigkeit, Geschwindigkeit, mit der sich die Längenänderung vollzieht, Einheit: s^{-1}

ε_V Mechanische Vergleichsdehnung

exp Exponentialfunktion, eine transzendente mathematische Funktion

FE Kurzbezeichnung für Finite-Elemente

Hz Hertz, Maß für Schwingungen bzw. Zyklen pro Sekunde

λ Mechanischer Verfestigungsparameter

l Länge (mm) bzw. (μmm)

Lot Das Material Lot, bzw. geometrischer Bereich, der aus Lotmaterial besteht

mm Einheit: Millimeter

N Einheit: Newton

Ni Chemisches Formelzeichen für Nickel, bzw. geometrischer Bereich, der aus Nickelmaterial besteht

ν Querkontraktion, dimensionslos

OMB Oberflächenmontiertes Bauteil — SMC

OMT Oberflächenmontagetechnik — SMT

Pa Einheit: Pascal

Pb Chemisches Formelzeichen für Blei

PCB Printed Circuit Board, bzw. der geometrische Bereich, der durch das Printed Circuit Board ausgefüllt wird.

PTH Plated Through Hole

Q Aktivierungsenergie

R Gaskonstante

R_m Fließgrenze, mechanische Spannung, Einheit: (Nmm⁻²) bzw. MPa

R_P Streckgrenze, mechanische Spannung, Einheit: (Nmm⁻²) bzw. MPa

Sb Chemisches Formelzeichen für Antimon

σ Mechanische Spannung, Einheit: (Nmm⁻²) bzw. MPa

σ_V Mechanische Vergleichsspannung

$\sigma(\varepsilon)$ Mechanische Spannung in Abhängigkeit von der mechanischen Dehnung

sinh Sinus Hyperbolikus, eine transzendente mathematische Funktion

SMC Surface Mount Component, bzw. der geometrische Bereich, der durch die Surface Mount Component ausgefüllt wird, synonym OMB

SMT Surface Mount Technologie, synonym OMT

Sn Chemisches Formelzeichen für Zinn

T Temperatur, Einheit: (°C) bzw. (K)

T_S Schmelztemperatur, Einheit: (°C) bzw. (K)

v_K Kriechgeschwindigkeit, Einheit: (μm/s)

1 Einleitung

Die Oberflächenmontage-Technologie

Die Oberflächenmontage von Leiterplatten (OMT, Surface Mount Technologie, SMT) wird seit Ende der sechziger Jahre eingesetzt. Bei dieser Technologie dient die Lötverbindung der mechanischen Arretierung des oberflächenmontierten Bauteils (OMB, Surface Mount Component, SMC) auf der Leiterplatte (Printed Circuit Board, PCB). Zudem stellt sie den elektrischen Kontakt zwischen SMC und Leiterbahn her.

Die SMT bietet besonders bei Verwendung nicht bedrahteter Bauteile gegenüber der Durchstecktechnik (Plated Through Hole (PTH) Technologie) die wesentlichen Vorteile des geringen Platzbedarfs, der hohen Funktions- und Leistungsdichte sowie des geringen Gewichts.[45]

Diese Vorteile werden gerne für Baugruppen, die unter anderem in Herzschrittmachern, Bremssystemen oder in Satelliten Verwendung finden, genutzt. Hier ist zuverlässiges Funktionieren über Jahre hinaus von größter Wichtigkeit. Bei diesen Anwendungen sind Inspektionszyklen meist nur unter erschwerten Bedingungen — wenn überhaupt — möglich.

Zuverlässigkeitaspekte

Als problematisch stellte sich die geringere Zuverlässigkeit der in SM-Technologie hergestellten Lötverbindung heraus. Werden mit Hilfe der SM-Technologie hohe Packungsdichten oberflächenmontierter Komponenten hergestellt, steigen im allgemeinen auch die Temperaturen auf der Leiterplatte an. Die verschiedenen Komponenten auf dem PCB erwärmen sich aufgrund des Stromdurchflusses verschieden stark und schnell. Dadurch dissipieren sie Wärmeenergie. Durch die erhöhte Packungsdichte verstärken sich die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von den an der Verbindung beteiligten Komponenten, d.h. PCB, Lot und SMC.

Motivation für die Aufgabenstellung

Um Aussagen über die Lebensdauer von neuen Baugruppen zu gewinnen, wird bisher der langwierige und kostenintensive Weg über den Prototypenaufbau und die Experimentierkammer beschritten.

Das dauert den Herstellern der in SM-Technik hergestellten Baugruppen bei den heute immer kürzer werdenden Innovationszyklen jedoch zu lange. Diese sind daran interessiert, frühzeitig genauere Aussagen über die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit ihrer in SM-Technologie hergestellten Neuentwicklungen zu erfahren.

Material

Als Material für die Verbindung von SMC und PCB werden in der Regel sogenannte Weichlote [20] eingesetzt. Es handelt sich vor allem um Zinn-Blei-Legierungen, denen teilweise weitere Materialien, wie zum Beispiel Silber (Ag) oder Antimon (Sb), zugesetzt werden.

Das in dieser Arbeit untersuchte Lotmaterial ist das ternäre Zinn-Blei-Silber Weichlot Sn62Pb36Ag2¹. Hoyt und andere [22, 54, 11] stellten fest, daß Lot dieser Zusammensetzung eine um 40% größere Zug- und Scherfestigkeit gegenüber konventionellen Sn60Pb40 Zinn-Blei Weichloten hat. Es wird für elektrische und elektronische Baugruppen eingesetzt, für die zuverlässiges Funktionieren über Jahre hinaus von größter Wichtigkeit ist.

In wenigen Studien [9, 26] werden Materialdaten für unterschiedliche Zusammensetzungen von Lot verglichen. Die Lotzusammensetzungen variieren von eutektischem Weichlot bis hin zu zinn- und bleireichen Loten. In diesen Arbeiten werden jedoch lediglich Lotmaterialdaten veröffentlicht. Lötverbindungen wurden weder experimentell untersucht noch simuliert. In Arbeiten von Michel [37], Paydar [42, 44, 43] und Pan [40], in denen experimentelle Untersuchungen oder Computersimulationen von Lötverbindungen beschrieben werden, wird die genaue Zusammensetzung des Lotmaterials vielfach nicht oder nur vage beschrieben.

Parameterabhängigkeit kontinuumsmechanischer Materialeigenschaften des Lotmaterials

In den bisher verwendeten Formeln zur Bestimmung der Anzahl der Thermozyklen² bis zum Ausfall von Lötverbindungen sind jeweils nur die Einflüsse weniger Materialparameter berücksichtigt worden. Das soll in der vorliegenden Arbeit erweitert werden, wenn gleich auch hier aufgrund begrenzter Rechnerkapazität nicht alle möglichen (bekannten) Parameter berücksichtigt werden können.

Da diese Arbeit einen kontinuumsmechanischen Ansatz verfolgt, wird beispielsweise der Einfluß von Materialparametern wie Bruchzähigkeit nicht näher untersucht. Ebenso wenig werden Alterungseffekte wie z.B. Vergrößerung der Kornstruktur und Bildung intermetallischer Phasen (Cu_6Sn_5) betrachtet.

Temperaturabhängigkeit der Materialparameter

Nur wenige Autoren [12, 32, 31, 34, 28, 40] gehen auf die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter ein. Bei manchen Autoren [50, 51] findet die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter noch nicht einmal Erwähnung.

Dehnungsverfestigung des Lotmaterials

Im einfachsten Fall wird ein linear-elastisches Materialmodell³ ($\sigma = E \cdot \epsilon$) zur Simulation des mechanisch-thermischen Verhaltens des Lotmaterials verwendet. Mit Modellen diesen

¹In dieser Schreibweise bedeuten die dem chemischen Element nachgestellten Zahlen den jeweiligen prozentualen Anteil dieser Komponente am Ganzen. Bsp.: Sn62 heißt, daß 62% Anteil der Verbindung aus Sn besteht.

²vgl. *Thermozyklus* im Anhang

³vgl. *Hooke'sches Gesetz* im Anhang

Typs kann nicht simuliert werden, daß sich in der Realität das Material plastisch zu verformen beginnt, sobald die mechanische Spannung die Streckgrenze R_p überschreitet. Das wird nur von wenigen Autoren [33, 34, 31, 46] berücksichtigt, obwohl es von fundamentaler Bedeutung ist, wenn anelastische Dehnungsvorgänge⁴ betrachtet werden.

In den Arbeiten dieser Autoren wird deswegen nach Überschreiten der Fließspannung der funktionale Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung als lineare Dehnungsverfestigung des Lotmaterials modelliert. Als Verfestigungsparameter⁵ wird dann häufig $\lambda = 0,1$ gewählt. Dies ist jedoch nur korrekt unter der Annahme, daß nach Erreichen der Fließspannung die Steigung von $\sigma(\varepsilon)$ ⁶ von E auf λE zurückgeht. Andere Autoren [64, 40] wählen ein 'power law'⁷, häufig ohne alle Koeffizienten anzugeben.

Geometrie

Bei jeder Simulation liegen nicht reale, sondern künstliche Randbedingungen vor, die eine geeignete Abstraktion der Realität darstellen müssen, wenn sie aussagefähig sein sollen. Das trifft auch für die in der Simulation verwendete Lötverbindungsgeometrie zu.

Lau simuliert die verschiedensten Konfigurationen von SMD (und PTH) Lötverbindungen mit unterschiedlichen Standhöhen⁸ und mit z.T. unterschiedlichen Finite-Element-Modellen [29, 30, 34]. Häufig stellen die verwendeten Modelle jedoch Idealisierungen dar, die nicht bei realen Lötverbindungen zu finden sind. Das führt zu überhöhten Werten bei der Berechnung der Spannungen. Dies betrifft insbesondere Modellgeometrien, die die Lötkontur an einigen Stellen nicht 'sanft' auslaufen lassen. An diesen Stellen treten dann bei der Finite-Element-Simulation Spannungssingularitäten auf, die kein Pendant in der Realität haben. Als Beispiel hierfür dient die häufig benutzte, stark vereinfachte Modellgeometrie einer Lötverbindung, in der alle in der Realität vorkommenden Begrenzungen (von Lot, SMC und PCB) als Geradenabschnitte ausgeführt sind.

Bei [42, 44, 43, 49] finden sich sowohl zwei- als auch dreidimensionale Finite-Element-Modelle. Sowohl bei SM-Bauteilen als auch bei Lötpads gibt es eine Unzahl an unterschiedlichen Bauformen und Geometrien. Hier soll eine typische Konfiguration für die Bauform 1206 nach DIN untersucht werden. Bei dieser Bauform beträgt die Abmessung der SMT-Lötverbindung wenige hundert μm . Die Grundfläche eines Lötpads beträgt ca. 400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ und die Standhöhe etwa 1 μm bis 120 μm .

Mathematisches Modell

Ein weiterer sensibler Punkt bei der Simulation mechanischer und physikalischer Zusammenhänge ist die Wahl geeigneter mathematischer Modelle.

Bei [40, 47, 9] wird für die Zeit- und Temperaturabhängigkeit des Kriechens eine *sinus*

⁴vgl. *anelastische Dehnung* im Anhang

⁵vgl. *Dehnungsverfestigung* im Anhang

⁶siehe *Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen*

⁷vgl. *power law* im Anhang

⁸vgl. *Standhöhe* im Anhang

hyperbolikus Repräsentation⁹ $\dot{\varepsilon} = A (\sinh B\sigma)^n (d)^m \exp(-Q/RT)$ ¹⁰ verwendet, die sowohl rechenzeitintensiv (Auswertung der transzendenten Funktionen \sinh und \exp) ist, als auch nur ungenau mit den vorliegenden experimentell ermittelten Daten in Übereinstimmung zu bringen ist. Andere Autoren [42, 43] verwenden ebenfalls *power law*¹¹ Repräsentationen für die Kriechgeschwindigkeit, verzichten jedoch auf die transzendenten *sinus hyperbolikus* Funktion.

Finite-Element-Simulationen

Die bisherigen Finite-Element-Simulationen (FE-Simulationen) von Lötverbindungen unterscheiden sich zum Teil beträchtlich. So beschränkt sich die FE-Simulation von Auray [1] auf eine rein elastische Modellierung des Lotes. Die FE-Simulationen von [29, 30, 34, 28, 50] beziehen zusätzlich plastische Phänomene mit ein. Dabei werden die Simulationen zum Teil mit unterschiedlichen finiten Elementen durchgeführt. Bei Pan [40] werden hingegen neben den elastischen noch Kriechvorgänge einbezogen.

In den Arbeiten von Lau [32, 31, 34, 28] wird die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter im theoretischen Teil unterstrichen, trotzdem werden in diesen Arbeiten bei den Simulationen dann konstante Materialeigenschaften (insbesondere bezüglich der Temperatur) zugrundegelegt. Auch in der Arbeit von Pan [40] wird die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter erwähnt. Dann jedoch wird beispielsweise für die Simulationsrechnung bei der Unterteilung der totalen Dehnung¹² $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c$ die Temperaturdehnung ε^c nicht mit berücksichtigt.

Thermozyklen

Während des normalen Betriebs erfahren Leiterplatten Temperaturschwankungen von höchstens +70 °C. Je nach Einsatzbereich, Tages- und Jahreszeit kommen unterschiedliche Ausgangstemperaturen vor, so daß diese Temperaturschwankungen während des Betriebes insgesamt im Temperaturbereich von -65 °C bis +125 °C liegen. Diese Temperaturschwankungen sind fast immer zyklischer Natur und haben typischerweise eine Dauer von einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden.

Temperaturbereich

Der relevante Temperaturbereich, um Aussagen über die Lebensdauer von Lötverbindungen zu erhalten, wird von verschiedenen Autoren bzw. Organisationen höchst unterschiedlich eingeschätzt.

In den militärischen Normungen [38] wird für einen Thermozyklus ein Temperaturhub von -55 °C auf +125 °C, also eine Temperaturdifferenz von +180 °C, festgelegt. [47] simuliert

⁹vgl. Anhang unter *Kriechgesetz*

¹⁰siehe *A, B, n, m* sind Konstanten, oder je nach speziellem Modell wieder Funktionen, siehe auch *Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen*

¹¹vgl. *power law* im Anhang

¹²vgl. mit Abschnitt 3.5

sogar einen Temperaturbereich von -50°C bis +150°C. Viele weitere Autoren [62, 40, 34] wählen diese Temperaturbereiche als Grundlage für Experimente oder Simulationen. Überstehen die Baugruppen 1000 dieser Zyklen, so gilt eine Lebenserwartung von ca. 10 Jahren als nachgewiesen. Es fragt sich jedoch, ob diese Temperaturbereiche in der Realität vorkommen.

So argumentieren [55], daß im tatsächlichen Betrieb von SMCs und Baugruppen kein einziger Thermozyklus zu beobachten sei, der über eine größere Temperaturdifferenz als 120°C geht. Es käme zwar vor, daß eine Baugruppe während ihrer gesamten Lebensdauer jede Temperatur des ganzen genannten Temperaturbereichs annimmt. Ein einzelner Thermozyklus bedeute in aller Regel jedoch sehr viel kleinere Temperaturhübe. Selbst unter extremen Bedingungen werden selten Thermozyklen beobachtet, die einen größeren Temperaturhub als 100°C ausmachen. Zum anderen sind die Bauteile laut Herstellerangaben häufig nur für Umgebungstemperaturen hergestellt, die unter +110°C betragen.

Temperaturprofil

Wenn Experimentatoren die zu testenden Konfigurationen zyklischen, sprunghaften Temperaturänderungen unterwerfen wollen, gibt es mehrere Methoden. Entweder wird die Testkonfiguration aus einem Flüssigkeitsbad mit der einen Temperatur in ein Flüssigkeitsbad der anderen Temperatur getaucht [38] oder es werden zwei Temperaturkammern konstanter Temperatur verwendet.

Sollen die zu testenden Konfigurationen trapezförmigen oder exponentiell verlaufenden Temperaturänderungen unterworfen werden, so kommt eine Temperaturkammer zur Verwendung, in der die Temperatur gezielt verändert werden kann.

Für eine realistische Simulation der Lötverbindung ist neben der Festlegung des simulierten Temperaturbereiches die Festlegung des zeitlichen Verlaufes der thermischen Belastungen ein wesentlicher Aspekt.

Bei fast allen Autoren wird die thermische Belastung entweder als sprunghafte [34] oder als trapezförmige [47] Temperaturänderung mit der Finite-Element-Methode simuliert.

Die meisten Autoren beginnen ihre Simulationsrechnungen bei dem unteren Temperaturwert und nehmen hierfür eine homogene Temperaturverteilung sowie Spannungsfreiheit der Konfiguration für diese (untere) Temperatur an. Das sind realistische Annahmen, da elektrische und elektronische Konfigurationen nach ihrer Herstellung und vor ihrem ersten Einsatz, in der Regel hinreichend lange (> 2 Wochen) unter konstanten Bedingungen lagern. Nur in [42, 43] findet sich die umgekehrte Vorgehensweise: Die gleichen Annahmen voraussetzend, beginnt er jedoch bei der hohen Temperatur und rechnet dann einen Abkühlungsvorgang, gefolgt von einem Erwärmungsprozeß.

In den Arbeiten von [8, 1] wird eine aufwendigere Variante der thermischen Belastung beschrieben, denn in diesen wird eine Temperatur-Quelle im SMC als Belastung für die Lötverbindung simuliert. Wegen des zur Zeit noch zu hohen Rechenaufwandes konnte dieser Variante in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter nachgegangen werden.

Lebensdauer

Um die Lebensdauer neuer PCBs vorauszusagen und zu verbessern, müssen die Ausfallmechanismen bekannt und beschreibbar sein. Dazu sind nachträgliche einfache Reihentests i.a. nicht geeignet. Also wurden Modelle entwickelt, um die Lebensdauer von Lötverbindungen zu schätzen [24].

Viele Autoren [12, 42, 43, 49] verwenden ein abgeändertes, meist generalisiertes, Coffin-Manson-Modell zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen. Die meisten partitionieren hierfür die totale Dehnungsamplitude, so daß elastische und plastische Dehnungsamplituden, zum Teil auch Kriechdehnungsamplituden, Berücksichtigung finden.

Ein ganz anderer Ansatz zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen wird von Wong [64] beschritten. In diesem Artikel wird ein bruchmechanisches Modell vorgestellt, in dem Rißwachstum als Zusammenwachsen von kleinsten Löchern im Lot beschrieben wird. In diesem grundlegenden Artikel wird ein unendliches Stück Lotmaterial untersucht, das unter Zugspannung steht, versehen mit einem Anfangsriß, der senkrecht zur Zugspannung verläuft.

All diesen Modellen ist gemeinsam, daß sie nicht gleichzeitig die thermischen, die elastischen und die plastischen sowie die Kriechdehnungen berücksichtigen.

Fazit: Das Problem, die Lebensdauer neuer PCBs schneller und besser vorauszusagen, ist bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst.

Problemstellung

In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, die Technik niederfrequenter¹³ Ermüdungsanalysen einer Lötverbindung per Computersimulation zu verfeinern, um in kürzerer Zeit eine genauere Aussage über deren Lebensdauer abzuleiten [57, 58].

Um schließlich die Frage "Wie lange hält die Lötverbindung?" beantworten zu können, ist eine Reihe von Teilfragen zu klären:

1. Mit welcher Lebensdauer der Lötverbindung ist zu rechnen?
2. Wie hängen die Lotmaterialdaten von der mechanischen Spannung (E-Modul), der Zeit (Kriechen) und von der Temperatur ab?
3. Welche Geometrie und welche Randbedingungen sollten für die Lötverbindung gewählt werden, um möglichst realistische Ergebnisse erwarten zu lassen?
4. Was muß bei der Vernetzung der Lötverbindung für die Finite-Element-Analyse beachtet werden?
5. Welche Aspekte sollten mit der Finiten-Elemente-Analyse untersucht werden?
6. Wie ist das Temperaturprofil zu wählen, um Thermozyklen möglichst realistisch in einer niederfrequenten Ermüdungsanalyse nachzubilden?
7. Wo sind die kritischen geometrischen Orte innerhalb der Lötverbindung?

¹³vgl. Niederfrequent bezieht sich in dieser Arbeit immer auf Frequenzen kleiner 1 Hz

2 Materialkennwerte und Geometrie der Lötverbindung

Zunächst werden die in den Simulationen verwendeten und untersuchten Kenngrößen zusammengestellt und gegebenenfalls definiert.

Ausgehend von den gemessenen, materialabhängigen Größen

E Elastizitätsmodul je Material angegeben in Nmm^{-2} bzw. GPa,

R_m Fließgrenze angegeben in Nmm^{-2} bzw. MPa für das Lotmaterial, gewonnen aus den Daten und

$\dot{\epsilon}$ Kriechgeschwindigkeit für Lotmaterial, gewonnen aus den Daten, Längenänderung je Zeiteinheit

und den der Literatur entnommenen, materialabhängigen Größen

α_T Temperaturausdehnungskoeffizient angegeben in $[10^{-6}/K]$, Längenänderung je Grad Temperaturunterschied und

ν Querkontraktion, dimensionslos, Verjüngung je Längenänderung

werden durch Vorgabe der

T Temperatur angegeben in $^{\circ}\text{C}$ die

σ mechanische Spannung, angegeben in Nmm^{-2} bzw. GPa die

ϵ mechanische Dehnung, dimensionslos, Dehnung aufgetragen über der Zeit

berechnet.

2.1 Festsetzung des zu untersuchenden Temperaturbereichs

Um das Verhalten von Lot in praxisrelevanten Temperaturbereichen besser einschätzen zu können, werden die Temperaturen durch Übergang zur homologen Temperaturskala (T/T_S) normalisiert. Die homologe Temperaturskala eines Materials erhält man, indem man die betrachteten Temperaturen des Materials, in Kelvin angegeben, auf seine Schmelztemperatur bezieht.

In Tien [55] findet sich ein Diagramm (Abb. 1), in dem die typischen Umgebungstemperaturen für Lot bei verschiedenen Anwendungen dargestellt sind. Die Temperaturen werden auf der oberen Skala in $^{\circ}\text{C}$ angegeben. Zusätzlich ist darunter eine zweite Skala

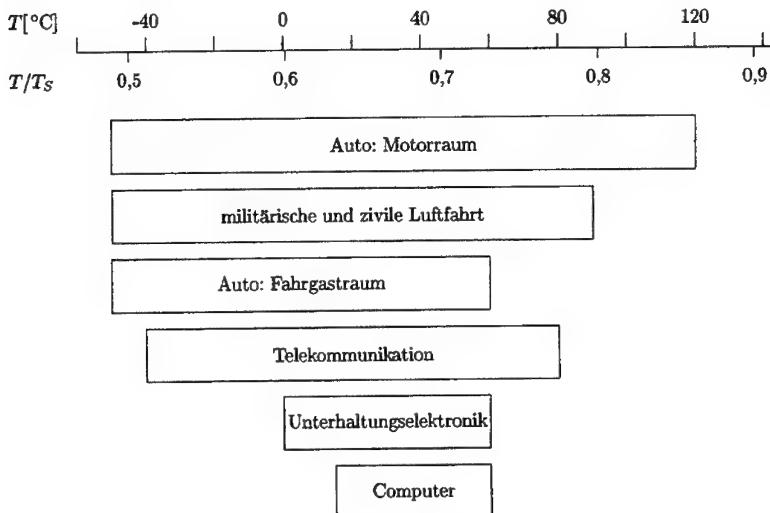


Abbildung 1: Typische Umgebungstemperaturen für Lot bei verschiedenen Anwendungen

angegeben, auf der die entsprechende homologe Temperatur des untersuchten ternären Zinn-Blei-Silber Weichlotes Sn62Pb36Ag2 abzulesen ist.

Der Temperaturbereich von -50°C bis $+120^{\circ}\text{C}$ entspricht — bei einer Schmelztemperatur des untersuchten ternären Weichlotes Sn62Pb36Ag2 von 456 K — einem homologen Temperaturbereich von 0,49 bis 0,86 des untersuchten Lotes.

Für die im folgenden beschriebenen Labormessungen an ternärem Zinn-Blei-Silber Weichlot Sn62Pb36Ag2 wird der Temperaturbereich -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ festgelegt, da die meisten elektronischen Bauteile für diesen Temperatureinsatzbereich produziert werden, wie aus den von den Herstellern herausgegebenen Datenblättern für diese Bauteile hervorgeht.

2.2 Experimentelle Ermittlung der Materialkennwerte des ternären Weichlotes Sn62Pb36Ag2

Eine Literaturrecherche ergab für die elastischen Materialkennwerte von eutektischem und nahezu eutektischem Zinn-Blei-Silber Weichlot keine einheitlichen Werte. Je nach Zusammensetzung variiert der E-Modul von Lot im Bereich von 12 GPa bis 50 GPa und die Poissonzahl im Bereich von 0,3 bis 0,4. Die experimentellen Randbedingungen, soweit dokumentiert, variieren zum Teil stark und sind vielfach in kaum vergleichbarer Form angegeben [9, 14, 18, 26, 34, 40, 47, 19].

Aus diesen Gründen ermittelten wir in einer Diplomarbeit [41] experimentell zunächst die

elastischen und plastischen Materialkennwerte sowie das Kriechen des von uns verwendeten ternären Zinn-Blei-Silber Weichlotes Sn62Pb36Ag2.

Es ist aus der Metallurgie-Literatur bekannt, daß Materialien, die in einem großen homologen Temperaturbereich betrieben werden, starke Variationen ihrer Materialkennwerte aufweisen. Bei den untersuchten Lötverbindungen wird nur das Lotmaterial in einem großen homologen Temperaturbereich betrieben. Da die Schmelztemperaturen der anderen Materialien relativ hoch sind, sind deren homologe Temperaturbereiche klein gegenüber dem des Lotes. Also wird die Temperaturabhängigkeit der elastischen und plastischen Materialparameter sowie die Temperaturabhängigkeit des Kriechens bei der experimentellen Untersuchung besonders berücksichtigt.

Alle Experimente werden bei Temperaturen von -20 °C, 0 °C, +24 °C, +50 °C und +80 °C durchgeführt. Auf diese Weise konnten die wesentlichen, unterschiedlichen Verhaltensweisen des Lotes bei niedrigen und bei hohen homologen Temperaturen erfaßt werden.

2.2.1 Vorbereitung der Proben

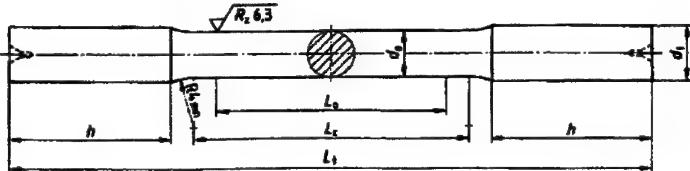


Abbildung 2: Rundzugprobe aus Weichlot Sn62Pb36Ag2

Probendurchmesser	d_0	12 mm	Kopfdurchmesser	d_1	15 mm
Kopfhöhe	h	40 mm	Anfangsmeßlänge	L_0	75 mm
Versuchslänge	L_c	80 mm	Gesamtlänge	L_t	210 mm

Es werden Rundzugproben aus eutektischem Weichlot Sn62Pb36Ag2 entsprechend den in der Norm DIN 50125 gegebenen Empfehlungen angefertigt. Diese werden bei +400 °C in zylindrische Rohlinge gegossen und dann an der Luft bei Raumtemperatur langsam abgekühlt. Anschließend erhielten die Rohlinge auf der Drehbank ihre endgültige Form. Da die einzelnen Proben aufgrund des Herstellungsprozesses unterschiedliche Mikrostrukturen bzw. Korngrößen aufwiesen, mußten sie einer reproduzierbaren Wärmebehandlung unterzogen werden. Nach Grivas [16] ergeben sich bei einer Anlaßtemperatur von +175 °C und einer Dauer von 21 Stunden Korngrößen von $5,5 \pm 4 \mu\text{m}$. Nach zweitägigem Anlassen ergeben sich Korngrößen von $7,8 \pm 4 \mu\text{m}$ und nach zehn Tagen Korngrößen von $9,9 \pm 2 \mu\text{m}$.

Unsere Untersuchungen ergaben keine wesentlichen Unterschiede in den Materialparametern bei zwölf- bzw. vierundzwanzigstündigem Erhitzen. Deshalb haben wir die Proben im folgenden über 12 Stunden in einer Temperaturkammer bei einer Temperatur von $+175 \pm 1$ °C erhitzt. So wird eine künstlich gealterte Materialstruktur erzeugt, und fertigungsbedingte Streuungen der Materialkennwerte werden auf ein Minimum reduziert. Die verbliebenen Streuungen der Materialkennwerte sind klein und werden deshalb im folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die so hergestellten Proben werden in einem einachsigen Zugversuch bei unterschiedlichen

Temperaturen geprüft.

2.2.2 Elastische und plastische Materialkennwerte

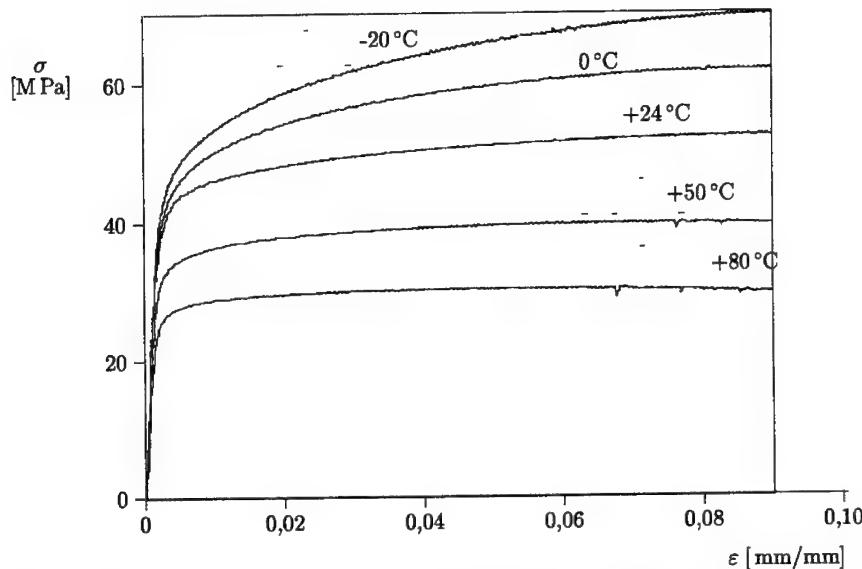


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Lots Sn62Pb36Ag2 für die Temperaturen -20°C , 0°C , 24°C , 50°C und 80°C

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven werden wegeregelt mit einer Rampengeschwindigkeit von 0.05 mm/s bis zum Zerreissen der Probe aufgenommen. Gemessen wird jeweils die Verlängerung der Probe, bezogen auf die Ausgangsmeßlänge $l_0 = 75 \text{ mm}$ bzw. die Kraft, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt A_0 jeweils bei -20°C , 0°C , 24°C , 50°C und 80°C .

In Abb. 3 ist der Verlauf der wahren Spannung σ über der logarithmischen Dehnung ε für die Temperaturen -20°C , 0°C , $+24^{\circ}\text{C}$, $+50^{\circ}\text{C}$ und $+80^{\circ}\text{C}$ dargestellt.

Im unteren Temperaturbereich ist eine Zunahme der Materialverfestigung mit wachsender Dehnung erkennbar. Bei zunehmender Temperatur ist eine nicht proportionale Abnahme der Zugfestigkeit des Lotes ablesbar. Betrachtet man die Kurve für $+80^{\circ}\text{C}$, so erkennt man ab 6% Dehnung eine beginnende Materialentfestigung. Die Zahlenwerte hierzu finden sich in der Tabelle 1. Die in der Literatur genannten Werte für den E-Modul variieren von 12 GPa bei Lau [34] über 15 GPa bei Harper [18] und Simon [19] und 30 GPa angegeben vom International Tin Research Institute [26] bis hin zu 50 GPa bei Pan [40], wobei die Autoren unterschiedliche experimentelle Randbedingungen zugrunde gelegt, diese jedoch nicht immer auch angegeben haben. Die von uns gemessenen Werte liegen also eher im unteren Bereich.

Temperatur T [°C]	-20	0	24	50	80
E-Modul E [GPa]	17,5	14,5	11,6	11,5	9,9
Zugfestigkeit R _m [MPa]	63,8	57,0	47,4	37,6	29,2

Tabelle 1: Temperaturabhängige elastische Materialkennwerte für Lot Sn62Pb36Ag2.

2.2.3 Kriechkennwerte

Die Proben werden, wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, vorbereitet, um die Vergleichbarkeit verschiedener Ergebnisse zu gewährleisten. Die Experimente zur Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit werden kraftgeregt bei Spannungen von 30,9 MPa (3,5 kN) und 44,2 MPa (5,0 kN) durchgeführt.

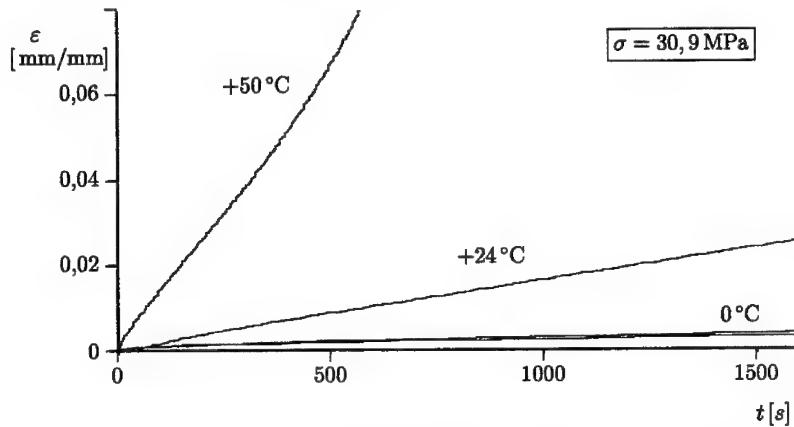


Abbildung 4: Kriechkurven für eine Zugspannung von 30,9 MPa

Gemessen wird in diesem Fall die Verlängerung der Probe, bezogen auf ihre Meßlänge, nach Aufbringen der entsprechenden Spannung in Abhängigkeit von der Zeit und Temperatur.

Auf den Abbildungen 4 und 5 ist jeweils die Kriechdehnung ε über der Zeit für verschiedene Temperaturen dargestellt.

Bereits bei leicht erhöhter Raumtemperatur (+24 °C) findet deutliches Kriechen im Lot statt. Die Kriechdehnung wächst in Abhängigkeit von der Temperatur exponentiell an. Beim Vergleichen der Abbildungen 4 und 5 ist zu erkennen, daß die Kriechdehnung in Abhängigkeit der (Zug-)Spannung überproportional anwächst.

Die temperaturabhängigen Kriechgeschwindigkeiten V_K in $\mu\text{m}/\text{s}$ bei unterschiedlichen Spannungen sind in Tabelle 2 für Lot Sn62Pb36Ag2 angegeben.

Im Bereich des primären Kriechens, d.h. je nach Temperatur und (Zug-)Spannung im Bereich der ersten 50 bis 100 Sekunden, nimmt die Kriechgeschwindigkeit ab. Sie bleibt

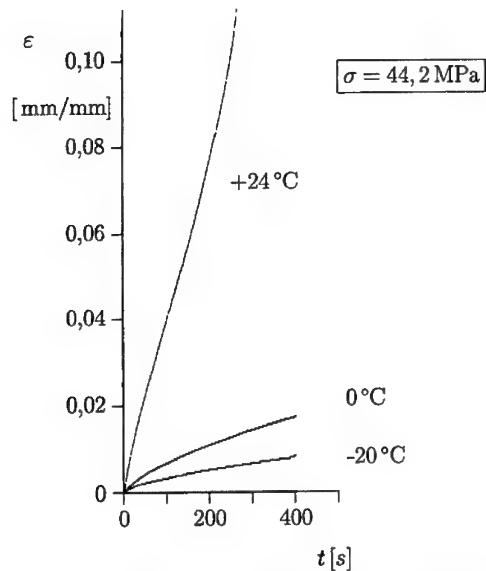


Abbildung 5: Kriechkurven für eine Zugspannung von 44,2 MPa

σ [MPa]	V_K [$\mu\text{m}/\text{s}$] bei einer Temperatur von			
	-20 °C	0 °C	+24 °C	+50 °C
30,9	0,084	0,114	1,24	8,39
44,2	0,501	1,43	28,13	—

Tabelle 2: Temperaturabhängige Kriechgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Spannungen

dann im Bereich des sekundären Kriechens über eine von der Temperatur und der (Zug-)Spannung abhängige Zeit nahezu konstant. Danach nimmt die Kriechgeschwindigkeit im Bereich tertiären Kriechens exponentiell bis zum Zerreissen der Probe zu.

2.3 Geometrie der Lötverbindung

Für die Geometriemodellierung der Lötverbindung wird das Schliffbild einer **realen** Lötverbindung (siehe Abb. 6) verwendet, das freundlicherweise von Dr. Ahrens vom CEM¹⁴ zur Verfügung gestellt wurde. Das Schliffbild zeigt eine der beiden Lötverbindungen eines SMD-Keramik-Vielschicht-Kondensators. Es wurde ausgewählt, da es eine typische SM-Lötverbindung darstellt. Das Bauteil ist 1570 μm tief.

¹⁴Centrum für Mikroverbindungstechnik Forschung und Entwicklung GmbH, Neumünster

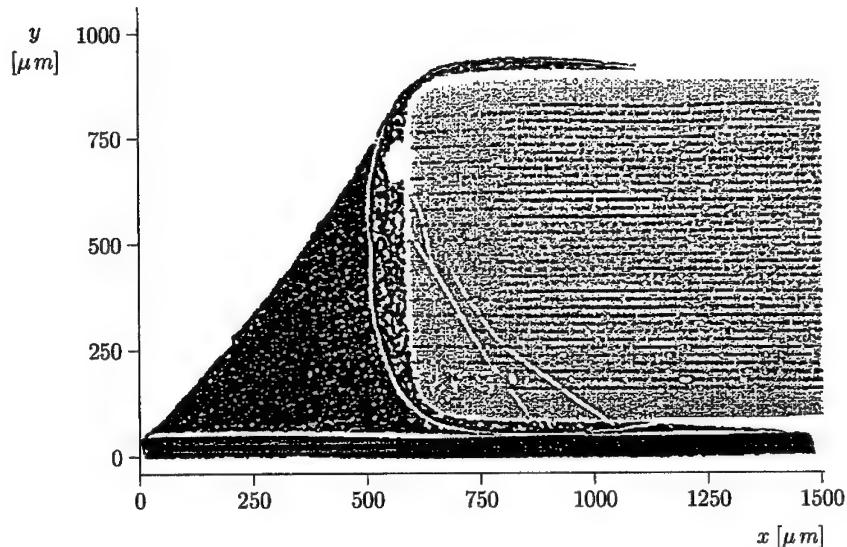


Abbildung 6: Schliffbild einer Lötverbindung eines Keramik-Vielschicht-Kondensators

Während in der Literatur bei der Modellierung von Lötverbindungen [34] relativ große Standhöhen Verwendung finden, ist beachtenswert, daß reale Lötverbindungen von SMC-Bauteilen Standhöhen aufweisen, die zwischen $1\text{ }\mu\text{m}$ und $120\text{ }\mu\text{m}$ variieren. Das bedeutet, daß der Lötspalt zwischen SMC und Kupfer-Lötfläche in realen Konfigurationen in der Regel nur wenige μm dünn ist.

Aus dem Schliffbild (Abb. 6) wurde mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung, dem System 'Optimas' von Stemmer, die der Finite-Element-Analyse zugrundeliegende Lötverbindungsgeometrie (siehe Abb. 7) gewonnen.

Für die Modellierung werden sechs an der Verbindungsstelle vorkommende Materialien nach Geometrie und Materialeigenschaften unterschieden:

- Die Surface Mounted Component besteht aus dem Keramik enthaltenden Rumpf (SMC),
- den aus Silber bestehenden Anschlußkappen (Ag) und
- der die Anschlußkappen überziehenden Nickelpassivierungsschicht (Ni). Letztere sorgt für eine verringerte Ausbildung von intermetallischen Zonen zwischen dem Silber und dem Lot.
- Hinzu kommt der die Verbindung herstellende Bereich des Lotwerkstoffes (Lot).
- Auf der anderen Seite dieses Bereiches schließt sich die auf der Leiterplatte (PCB)

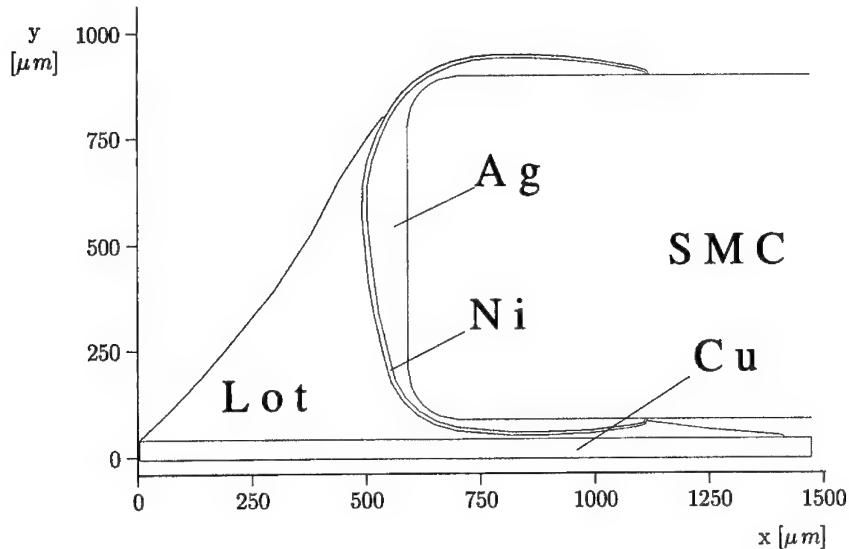


Abbildung 7: Aus dem Schliffbild 6 abgeleitete Geometrie

- auflaminierte kupferne Lötlandefläche (Cu) an.

Die in Klammern angegebenen Abkürzungen werden im folgenden für den entsprechenden geometrischen Bereich bzw. die diesem Bereich zugeordneten Materialeigenschaften und Materialkennwerte verwendet.

2.4 Materialkennwerte von Keramik, Silber, Nickel, Kupfer und Leiterplatte

Die elastischen Materialkennwerte der zusätzlich zum Lot verwendeten Materialien Keramik, Silber, Nickel, Kupfer und Leiterplatte werden der Literatur ([23], [34], [41]) entnommen (siehe Tabelle 3).

Material	Lot Sn62Pb36Ag2	Ag	Cu	PCB	Ni	SMC
E-Modul E [GPa]	17,5 ... 9,9	80	125	11	206	255
Querkontraktion ν	0,4	0,38	0,34	0,28	0,31	0,3
Temperaturoausdehnungskoeffizient $\alpha_T \cdot 10^{-6} / ^\circ C$	21,0	19,7	16,8	15,0	13,3	6,0

Tabelle 3: Elastische Materialkennwerte aller verwendeten Materialien

In dieser Tabelle sind die experimentell gewonnenen Werte der E-Moduli für das Lot Sn62Pb36Ag2 (vgl. Tabelle 1) eingesetzt.

Im Vergleich zum Lot haben die beiden Verbindungspartner des Lotes (LOT) (vgl. Abb. 7) — Kupfer (Cu) auf der einen, die Nickel-Silber-Kappe (Ni-Ag) des SMC und die Keramik des SMC auf der anderen Seite — einen bis zu 25-fach höheren E-Modul. Sie sind also um ein Vielfaches härter als das Lot.

Für die vorliegende Finite-Element-Analyse wird die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls nur für den Lotwerkstoff berücksichtigt. Für die anderen Materialien ist die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls vernachlässigbar, da sich in dem untersuchten Temperaturbereich die Materialkennwerte im Vergleich zu denen des Lotes nur unwesentlich ändern.

Zudem werden in dieser Tabelle (vgl. Tabelle 1) die Temperaturausdehnungskoeffizienten (vgl. Abb. 8) sowie die Querkontraktionszahlen der verwendeten Materialien zusammengestellt.

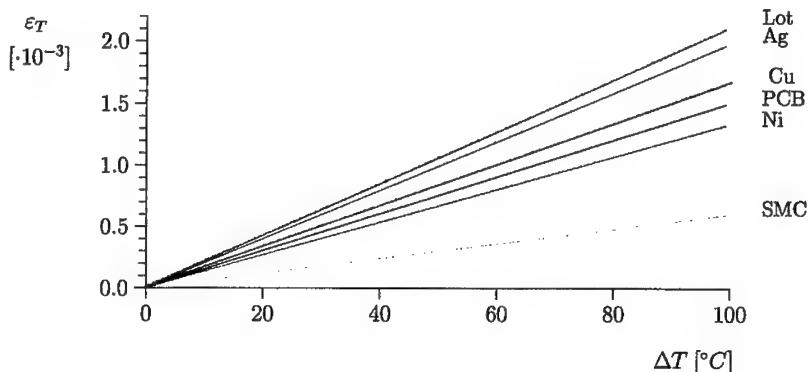


Abbildung 8: Thermische Dehnung $\varepsilon_\alpha = \alpha_T \cdot \Delta T [\cdot 10^{-3}]$ aufgetragen über der Temperaturänderung ΔT

3 Überblick über das Vorgehen bei der Finite-Element-Analyse der Lötverbindung

3.1 Schematisierte Darstellung der Lötverbindung

Die geometrischen und mechanischen Vorgänge in einer Lötverbindung einer Baugruppe während ihrer Lebensdauer sind recht komplex. Zur Vereinfachung wird isotropes Materialverhalten für alle beteiligten Materialien zugrundegelegt. Isotropes Materialverhalten wird auch in allen folgenden Simulationen angenommen.

Um herauszufinden, wie eine reale Lötverbindung zu simulieren ist, damit Aussagen über ihre Zuverlässigkeit und ihre Lebensdauer gewonnen werden können, wird zunächst eine stark vereinfachte Lötverbindung betrachtet.

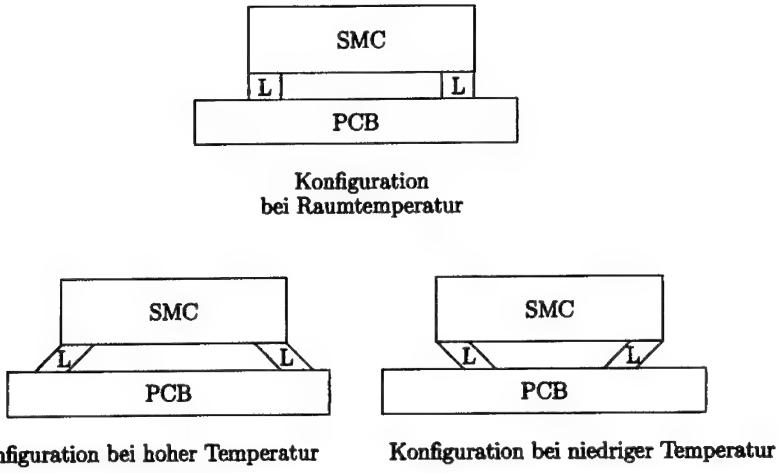


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Lötverbindung bei Temperaturwechselbelastung

In Abb. 9 ist schematisch die geometrische Konfiguration einer Lötverbindung beim Einschalt- bzw. Ausschalt-/Abkühlvorgang dargestellt. In der Mitte oben ist die Konfiguration bei Raumtemperatur und mechanischer Spannungsfreiheit abgebildet. Links unten ist die Lötverbindung bei hoher und rechts unten bei niedriger Temperatur dargestellt.

Diese unterschiedlichen Konfigurationen entstehen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien. Nach Huette [23] beträgt der thermische Ausdehnungskoeffizient von Lot $\alpha_{T, \text{Lot}} = 21 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, von der Leiterplatte $\alpha_{T, \text{PCB}} = 15 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ und vom SMC $\alpha_{T, \text{SMC}} = 6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Das bedeutet, daß ein Temperaturanstieg, der eine Ausdehnung des SMC um eine Einheit hervorruft, eine doppelt so große Ausdehnung der Leiterplatte bewirkt und sogar eine dreifache des Lotes. Daher wird das Lotdepot (L) wie in Abb. 9 abgebildet verformt.

3.2 Vereinfachte Betrachtung der Lötverbindung als Doppel-Thermobimetall

In einer Lötverbindung gibt es mehrere Grenzflächen zwischen Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. In der oben geschilderten vereinfachten Darstellung der Lötverbindung kann Thermobimetall-Verhalten zweier Grenzflächen beobachtet werden [27]:

Erstens an der Grenzfläche zwischen der Leiterplatte und dem Lot und zweitens an der

Grenzfläche zwischen dem Lot und der Komponente.

Bei einem Bimetallstreifen werden zwei Materialien mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungsverhalten fest miteinander verfügt [21].

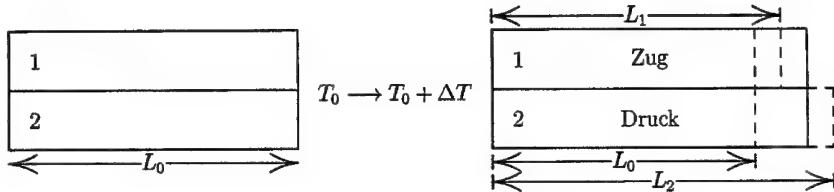


Abbildung 10: Bimetall-Streifen im spannungsfreien Zustand bei einer Temperatur von $T = T_0$ (links) und mit behinderter Wärmedehnung nach einer Temperaturerhöhung von ΔT (rechts)

Auf Abbildung 10 ist ein Bimetall-Streifen in spannungsfreiem Zustand abgebildet. Wird die Temperatur erhöht, so verformt sich der Bimetall-Streifen wie auf Abbildung 11 gezeigt. Die beiden Materialien sind bei der Ausgangstemperatur T_0 gleich lang (L_0). Durch Erwärmung um die Temperatur ΔT wird das Material 1 auf die Länge L_1 und das sich stärker ausdehnende Material 2 auf die Länge L_2 gedehnt. Da beide Materialien fest miteinander verfügt sind, werden beide Dehnungen durch die jeweils andere behindert. Hierdurch wird das Material 1, das sich thermisch geringer ausdehnt, vom Material 2, das sich thermisch stärker ausdehnt, unter Zugspannung gesetzt. Umgekehrt erzeugt das Material 1 im Material 2 eine Druckspannung. Da beide Materialien fest miteinander verbunden sind, wird Material 1 durch Material 2 in die Länge gezogen und die Längenausdehnung von Material 2 wird von Material 1 behindert. So verbiegt sich der Bimetall-Streifen wie auf der folgenden Abbildung (Abb. 11) skizziert. Ursache hierfür sind die auf Abbildung 10 skizzierten behinderten Wärmedehnungen.

Der Unterschied in der thermischen Ausdehnung ergibt sich aus

$$\Delta\epsilon_\alpha = \Delta\alpha\Delta T = (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T. \quad (1)$$



Abbildung 11: Biegung des Thermobimetals bei einer Temperatur von $T = T_0 + \Delta T$

3.3 2- und 3-D Simulationen an Modell-Lötverbindungen

Zunächst werden rein elastische Finite-Element-Simulationen mit zwei- und dreidimensionalen Modell-Lötverbindungen durchgeführt. Dabei wird eine vereinfachte Geometrie, wie sie z.B. von Lau [34] und den meisten anderen Autoren verwendet wird, zugrunde gelegt. Als Belastung der Lötverbindung wird ein Temperatursprung von -20°C auf $+80^{\circ}\text{C}$ simuliert.

Betrachtet man Längsschnitte der Lötverbindung, ergibt sich bei der dreidimensionalen Simulation, daß im Mittenquerschnitt der Lötverbindung der ebene Dehnungszustand vorherrscht. An den Außenkanten des Bauteils bildet sich im wesentlichen ein ebener Spannungszustand aus.

Da für die Bauteile mit den geometrischen Ausdehnungen $l \times b \times h$ in der Regel $b >> h$ gilt, ist der Bereich des ebenen Dehnungszustandes von größerer Bedeutung, so daß in den folgenden Simulationen lediglich ebene Dehnungszustände analysiert werden.

3.4 2-D Simulation realer Lötverbindungen

Die bisher beschriebenen Modelle berücksichtigen lediglich das Thermobimetall-Verhalten zweier Grenzflächen in der Lötverbindung. Die Grenzflächen bestehen jeweils zwischen den folgenden Materialien:

1. Leiterplatte — Lot
2. Lot — Komponente.

Die hierbei beobachteten Dehnungsunterschiede erlauben nur eine globale Beurteilung der in der Lötverbindung ablaufenden Ermüdungsprozesse ([34], [12]). Um realitätsnähere Simulationsbedingungen zu bekommen und um in der Simulationsrechnung die Anzahl der geometrisch bedingten Spannungssingularitäten zu minimieren, wird als Modellgeometrie die Kontur einer *realen* Lötverbindung verwendet (vgl. Abbildung 6). Dieses Vorgehen führt zur Benutzung "weicherer" Konturen bei der Lötverbindung, als es der Fall bei den meistens verwendeten, weiter vorn vorgestellten, modellhaften Vereinfachungen ist.

Für eine genauere Ermüdungsanalyse der Lötverbindung ist es zudem unerlässlich, die thermischen Ausdehnungsunterschiede weiterer an der Lötverbindung beteiligter Materialien zu untersuchen. Zum Beispiel können die Kontakte des SMC aus einer mit einer Nickel-Passivierungsschicht überzogenen Silberkappe bestehen. Außerdem ist zur elektrischen und mechanischen Verbindung eine kupferne Lötlandefläche auf der Leiterplatte auflaminiert, auf der das Bauteil aufgelötet wird. Betrachtet man nur diese drei weiteren Materialien zuzüglich zu der Komponente, dem Lot und der Leiterplatte, so sind anstatt zweier Grenzflächen nun fünf Grenzflächen mit Thermobimetall-Verhalten zu berücksichtigen. Die Grenzflächen bestehen jeweils zwischen den folgenden Materialien:

1. Leiterplatte — Kupfer-Landefläche
2. Kupfer-Landefläche — Lot

3 Überblick über das Vorgehen bei der Finite-Element-Analyse der Lötverbindung 19

3. Lot — Nickel-Passivierungsschicht
4. Nickel-Passivierungsschicht — Silber
5. Silber — Komponente.

Um die geometrischen und mechanischen Vorgänge in einer realen Lötverbindung einer Baugruppe während ihrer Lebensdauer zu untersuchen, wird zunächst lediglich ein Einschaltvorgang analysiert. Danach wird ein aus vier Abschnitten bestehender Zyklus entsprechend den in einer realen Lötverbindung auftretenden Beanspruchungen simuliert:

1. Einschalten,
2. betreiben,
3. ausschalten und
4. im Ruhezustand belassen.

3.5 Unterteilung der Gesamtdehnung

Um das Ziel, eine verfeinerte Ermüdungsanalyse durchzuführen, zu erreichen, ist es erforderlich möglichst genaue Angaben über die qualitative und quantitative Dehnungsverteilung innerhalb einer Lötverbindung zu gewinnen. Also werden bei der Finite-Element-Simulation vier Anteile der Gesamtdehnung unterschieden:

1. Die **thermische** Dehnung ε_α mit $\varepsilon_\alpha = \alpha_T \cdot \Delta T$ tritt als Reaktion auf die vorgegebenen thermischen Randbedingungen auf.
2. Die **elastische** Dehnung ε_e beschreibt die reversiblen Formänderungen. Die Materialien in einer Lötverbindung sind fest miteinander verbunden. Da sie sich verschieden stark ausdehnen, werden sie sich zunächst elastisch verformen.
3. Die **plastische** Dehnung ε_p beschreibt zeitunabhängige Phänomene. Dehnen sich die Materialien nach Erreichen der Plastizitätsgrenze weiter aus, so treten bleibende Formänderungen auf.
4. Die **Kriechdehnung** ε_c beschreibt zeitabhängige Phänomene. Steht ein Material unter Spannung, so verändert es über die Zeit in Abhängigkeit von Temperatur und Größe der Spannung seine Gestalt: Es kriecht.

In den folgenden Simulationen werden die verschiedenen Dehnungsanteile entsprechend den aus den Experimenten gewonnenen Materialdaten berücksichtigt.

3.6 Simulationswerkzeuge

Für die numerische Simulation der Lötverbindung wird ein nichtlinearer FE-Code benötigt, da bei der Finite-Element-Analyse der Lötverbindung nichtlineare konstitutive Gleichungen auftreten. Die Wahl fiel auf das Finite-Element-Programm MARC, da diese Software die Möglichkeit bietet, Materialgesetze in Form von FÖRTRAN-Unterprogrammen einzubinden. Für die linearen und multilinear Interpolationen der aus den Experimenten gewonnenen Materialdaten werden Unterprogramme für das plastische Verhalten des Lotmaterials¹⁵ und das Kriechverhalten¹⁶ des Lotmaterials in FÖRTRAN entwickelt.

4 Mathematische Modellierung der Materialgesetze

4.1 Verwendete Materialgesetze zur Modellierung des Verhaltens von PCB, Cu, Ni, Ag und SMC.

Für die Simulation der geometrischen Bereiche mit den Materialeigenschaften von SMC, Ag, Ni, Cu und PCB wird jeweils ein lineares Hookesches Gesetz und lineare thermische Ausdehnung zugrundegelegt.

Plastische und Kriechverformungen werden in Bereichen mit diesen Materialeigenschaften nicht simuliert, da sich diese geometrischen Bereiche im Vergleich zu dem des Lotes — unter Berücksichtigung des untersuchten Lotes — nur unwesentlich plastisch bzw. kriechend verformen.

4.2 Mathematische Modellierung des Lotmaterialverhaltens

Für die Finite-Element-Analyse (FEA) werden thermische Dehnungen ε_α , elastische Dehnungen ε_e , plastische Dehnungen ε_p sowie Kriechdehnungen ε_c im Lotmaterial berücksichtigt. Es wird der in Gleichung Gl. (2) dargestellte Zusammenhang zwischen der Gesamtdehnung des Lotes ε_{Lot} und den berücksichtigten Dehnungsanteilen zugrundegelegt.

$$\varepsilon_{\text{Lot}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_\alpha \quad (2)$$

Die Änderung der Temperatur des Modells der Lötverbindung hat thermische Dehnungen zur Folge. Für den Zusammenhang zwischen Temperaturänderung ΔT und thermischer Dehnung ε_α wird ein linearer Zusammenhang zugrunde gelegt:

$$\varepsilon_\alpha = \Delta T \cdot \alpha_T \quad (3)$$

¹⁵Unterprogramm WKSPL für plastisches Materialverhalten

¹⁶Unterprogramm CRPLAW für Kriechverhalten

Auf Abbildung 8 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Die thermische Dehnung ε_a der beteiligten Materialien ist über der Temperaturänderung ΔT aufgetragen.

Der für die Beschreibung des elastischen Dehnungsanteils ε_e wesentliche E-Modul des Lotes E_{Lot} — im folgenden kurz E genannt — ist von der Temperatur T abhängig. Es gilt $E = E(T)$. Um diese Temperaturabhängigkeit in angemessener Weise zu berücksichtigen, wird im Unterprogramm ‘WKS LP’ stückweise linear, zwischen den bei verschiedenen Temperaturen T_i gemessenen Werten $E(T_i)$ interpoliert, wie in Gleichung Gl. (4) dargestellt. Wie in Abbildung 12 deutlich wird, besteht kein einfacher Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Elastizitätsmodul.

$$E(T) = (1 - r) \cdot E(T_i) + r \cdot E(T_{i+1}), \quad (4)$$

mit $i \in 1, 2, 3, 4$, wobei $T_i \leq T < T_{i+1}$ mit

	i	1	2	3	4	5
$T_i [^{\circ}\text{C}]$		-20	0	24	50	80
$E(T_i) [\text{GPa}]$		17,5	14,5	11,6	11,5	9,9

Zur Abkürzung wird $r = \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i}$ gesetzt.

Die wahre Spannung $\sigma = \sigma(T, \varepsilon_p)$ ist wichtig für die Beschreibung des plastischen Dehnungsanteils ε_p . Sie ist sowohl abhängig von der Temperatur T als auch von der Vergleichsdehnung ε . Im Unterprogramm ‘WKS LP’ wird die wahre Spannung σ stückweise bilinear zwischen den gemessenen Werten $\sigma_{i,j}$ nach Gleichung Gl. (5) interpoliert. Dabei gibt der Index i die Abhängigkeit der Spannung von der gemessenen Vergleichsdehnung ε_i und der Index j die Abhängigkeit von der Temperatur T_j an.

Auf Abbildung 13 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Die wahre Spannung ist über der horizontal nach rechts aufgetragenen logarithmischen plastischen Dehnung ε_p und der horizontal nach hinten aufgetragenen Temperatur aufgetragen. Die Colorierung gibt den Wert der partiellen Ableitung der wahren Spannung nach der Temperatur wieder. Es wird deutlich, daß diese Richtungsableitung im allgemeinen nicht konstant für beliebige, aber feste plastische Dehnungen ist.

In Anlehnung an Lau [34] wird isotrope Materialverfestigung für den Lotwerkstoff angenommen. Aus den experimentell ermittelten Lotmaterialdaten geht hervor, daß das Fließen ab einer elastischen Dehnung von 0,1% beginnt.

Zur Beschreibung des Kriechdehnungsanteils ε_c wird das Vergleichskriechdehnungssinkrement $\Delta\varepsilon_c = \Delta\varepsilon_c(T, \sigma, t)$ bestimmt. Das ist eine von der Temperatur T_j , der Vergleichsspannung σ_k und der Zeit abhängige Größe, die sich aus den entsprechenden Meßwerten $\varepsilon_{i,j,k}$ der Messung der Kriechgeschwindigkeiten V_K ergibt. Das Vergleichskriechdehnungssinkrement wird im Unterprogramm ‘CRPLAW’ stückweise trilinear nach Gleichung Gl. (6) interpoliert.

$$\begin{aligned}\sigma = & (1-r) \cdot ((1-s) \cdot \sigma_{i,j} + s \cdot \sigma_{i,j+1}) \\ & + r \cdot ((1-s) \cdot \sigma_{i+1,j} + s \cdot \sigma_{i+1,j+1})\end{aligned}\quad (5)$$

mit $i \in 1, 2, \dots, 10$, wobei $\varepsilon_i \leq \varepsilon < \varepsilon_{i+1}$
und $j \in 1, 2, 3, 4$, wobei $T_j \leq T < T_{j+1}$.

Zur Vereinfachung wird $r = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}$
sowie $s = \frac{T - T_j}{T_{j+1} - T_j}$ gesetzt.

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_c = & (1-s) \cdot [(1-r) \cdot ((1-t) \cdot \varepsilon_{i,j,k} + t \cdot \varepsilon_{i,j,k+1}) \\ & + r \cdot ((1-t) \cdot \varepsilon_{i,j+1,k} + t \cdot \varepsilon_{i,j+1,k+1})] \\ & + s \cdot [(1-r) \cdot ((1-t) \cdot \varepsilon_{i+1,j,k} + t \cdot \varepsilon_{i+1,j,k+1}) \\ & + r \cdot ((1-t) \cdot \varepsilon_{i+1,j+1,k} + t \cdot \varepsilon_{i+1,j+1,k+1})]\end{aligned}\quad (6)$$

mit $i \in 1, 2, \dots, 30$, und Zeit $i \leq t <$ Zeit $i+1$
und $j \in 1, 2, 3, 4$, und $T_j \leq T < T_{j+1}$
sowie mit $k \in 1, 2$, und $\sigma_k \leq \sigma < \sigma_{k+1}$.

Zur Vereinfachung wird $s = \frac{T - T_j}{T_{j+1} - T_j}$,
 $r = \frac{\text{Zeit } i - \text{Zeit } i}{\text{Zeit } i+1 - \text{Zeit } i}$ und $t = \frac{\sigma - \sigma_k}{\sigma_{k+1} - \sigma_k}$ gesetzt.

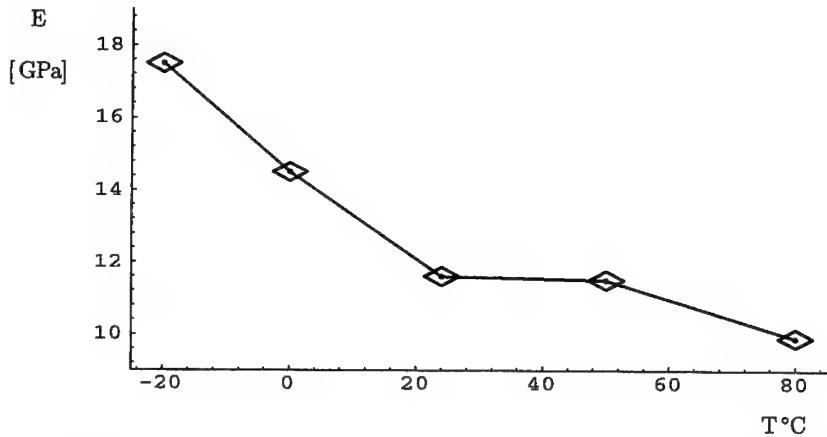


Abbildung 12: Stückweise lineare Interpolation des E-Moduls des Lotes in Abhängigkeit von der Temperatur T

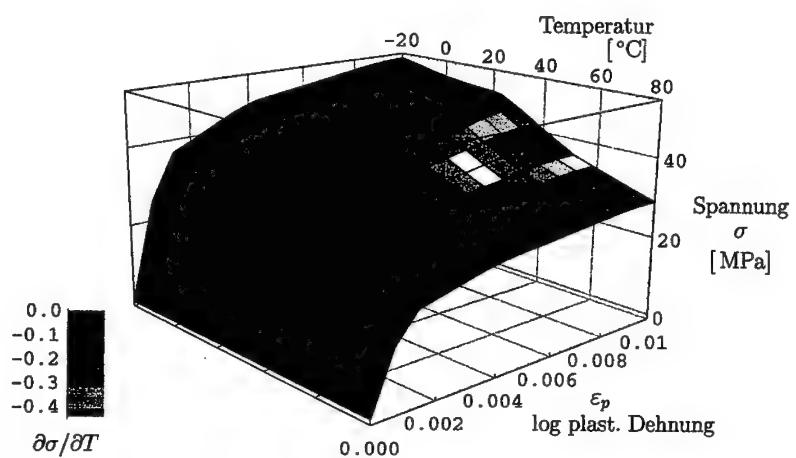


Abbildung 13: Stückweise bilineare Interpolation der wahren Spannung σ in Abhängigkeit der logarithmischen plastischen Dehnung ε_p und Temperatur T mit Einfärbung nach dem Wert der partiellen Ableitung von σ nach T

5 Thermisches Belastungsprofil I: Temperaturanstieg

Durch das thermische Belastungsprofil I wird der Einschaltvorgang einer Baugruppe simuliert. Vorausgesetzt wurde, daß die Baugruppe bereits hinreichend lange der Ausgangstemperatur ausgesetzt war. Deshalb wird ein mechanisch spannungsfreier Zustand der Baugruppe zu Beginn des Temperaturanstiegs angenommen. Dann wird die Temperatur monoton auf die Betriebstemperatur erhöht.

5.1 Beschreibung des Temperaturanstiegs

Durch das im folgenden beschriebene thermische Belastungsprofil I wird der Einschaltvorgang einer Baugruppe simuliert. Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, wird der Temperaturbereich auf den Bereich von -20°C bis 80°C festgelegt und von einer homogenen Temperaturverteilung im Modell ausgegangen.

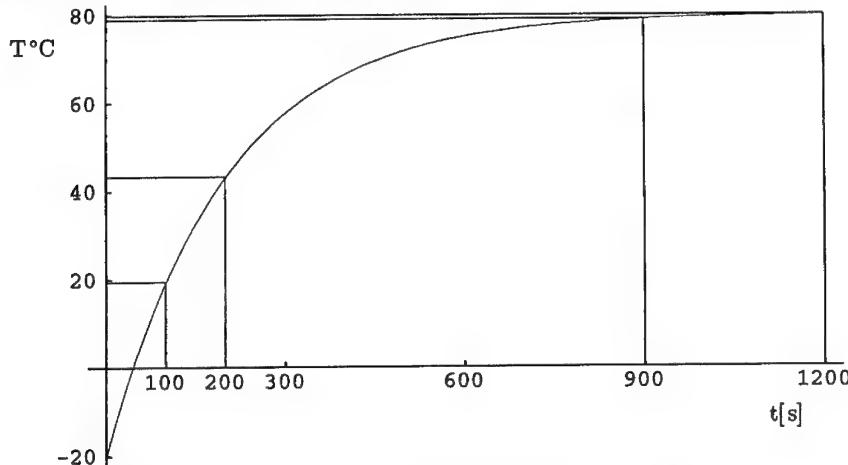


Abbildung 14: Thermisches Belastungsprofil I der Lötverbindung: Temperaturanstieg

Dieser Temperaturanstieg wird in Gleichung Gl. (7) mathematisch beschrieben und ist auf Abbildung 14 graphisch dargestellt.

$$T(t) = -20 + 100 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (7)$$

In der den Temperaturanstieg beschreibenden Gleichung Gl. (7) steht

T für die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ und

t für die Zeit in Sekunden.

$\tau = 200$ ist eine Konstante [s].

Nach diesem Modell erwärmt sich die Lötverbindung in 100 s auf Raumtemperatur, hier $292^\circ \approx 19^\circ\text{C}$, wenn man eine Ausgangstemperatur von -20°C zugrundelegt. Nach weiteren 100 s findet eine Erwärmung auf $316,2\text{K} \approx 43^\circ\text{C}$ statt. Nach 900 s ist eine Temperatur von $352^\circ \approx 79^\circ\text{C}$ erreicht. Anschließend steigt die Temperatur während einer Zeitspanne von 300 s langsam weiter auf die Betriebstemperatur von $353^\circ \approx 80^\circ\text{C}$.

5.2 Geometrie der Lötverbindung und Verschiebungsrandbedingungen

Die Geometrie des Finite-Element-Modells der Lötverbindung (siehe Abb. 15) wird abgeleitet aus dem auf Abbildung 7 dargestellten Bild. Ausgehend von Abbildung 7 erhält

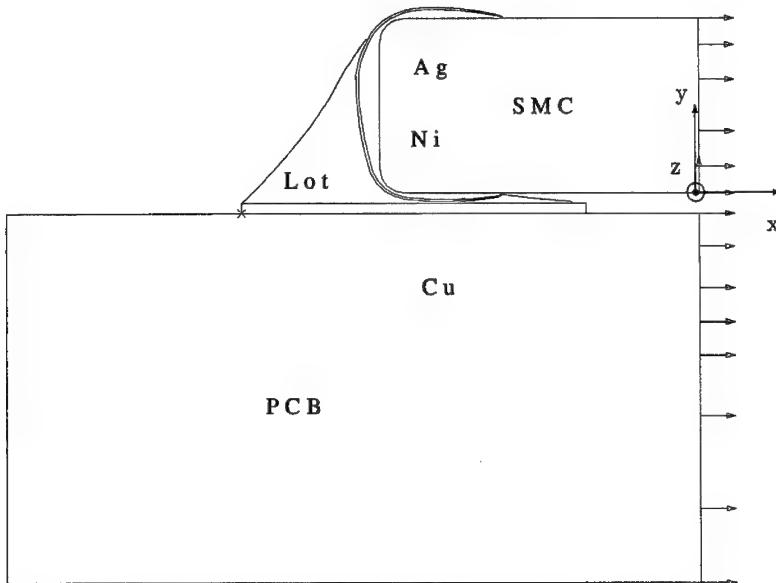


Abbildung 15: Geometrie und Randbedingungen der Lötverbindung

man nach Einsetzen der tatsächlichen Größen des Keramik-Vielschicht-Kondensators, der Kupfer-Landefläche, der Standhöhe und der Leiterplattendicke die auf Abbildung 15 vergrößert dargestellten geometrischen Verhältnisse. Zur Reduktion des Rechenaufwandes werden die beiden Lötverbindungen des SMC symmetrisch modelliert. Obwohl das in der Realität nicht zutrifft — keine zwei Lötverbindungen auf einer Leiterplatte haben dieselbe Geometrie — ist der hierdurch entstehende Rechenfehler vernachlässigbar klein, und die Rechenzeit verkürzt sich um die Hälfte.

In der Realität sind Bauteile auf einer Baugruppe oder einer Leiterplatte montiert, die auf unterschiedlichste Art und Weise in Gehäusen mechanisch gelagert sind. So können die in der Regel rechteckigen PCBs durch Schrauben an 4 Ecken arretiert sein, in einen Standard-Einschubschrank (z.B. 19" Rack) eingeschoben sein oder wie bei modernen PC an einer Ecke arretiert und an 3 oder mehr Stellen nur locker (verschieblich) gestützt werden.

Ausgehend von einer mechanischen Fixierung wie bei modernen PC werden symmetrische Randbedingungen an einer, hier der rechten Seite in x-Richtung angenommen (siehe Abb. 15). Ein Knotenpunkt, der in der Abb. 15 als Kreis in der unteren rechten Ecke des SMC dargestellt ist, wird zusätzlich in y-Koordinatenrichtung festgehalten, um Starkörperbewegungen auszuschließen.

Bei dieser vereinfachenden Betrachtungsweise darf nicht vergessen werden, daß ein Bauteil in der Regel nicht allein auf einer Leiterplatte montiert ist. Vielmehr sind viele Bauteile mit verschiedenen Formen und insbesondere unterschiedlicher mechanischer Festigkeit auf ihr nach vorwiegend elektrisch-funktionalen Gesichtspunkten zusammen montiert.

5.3 Verwendete Elementtypen

Die Simulationsrechnungen werden mit unterschiedlichen Elementtypen durchgeführt. Zwei Kriterien werden dabei untersucht:

1. Welcher Elementtyp bringt Simulationsergebnisse hervor, die der Realität am nächsten kommen?
2. Welches ist derjenige Elementtyp, bei dem unter der erstgenannten Bedingung die kürzeste Rechenzeit für die Simulation benötigt wird?

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien werden mehrere Simulationen durchgeführt, bei denen verschiedene Elementtypen und Elementtypkombinationen verwendet werden:

1. lineare Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes,
2. quadratische Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes im Lotbereich
lineare Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes in allen anderen Bereichen,
3. lineare Viereckselemente ebenen Spannungszustandes,
4. quadratische Viereckselemente ebenen Spannungszustandes im Lotbereich
linearen Viereckselementen ebenen Spannungszustandes in allen anderen Bereichen,
5. lineare Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes
lineare Dreieckselemente ebenen Dehnungszustandes an wenigen Stellen mechanisch geringer Belastung im Bereich des Lotes — zwecks einfacherer Handhabung.

5.4 Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung

In dieser Arbeit wurden alle Vernetzungen mit dem Preprocessor I-DEAS generiert und zum großen Teil 'von Hand' nachgearbeitet, um eine gleichmäßig gute Elementqualität zu gewährleisten, wie im folgenden noch näher erläutert werden wird.

Es werden jeweils drei verschieden feine Netze verwendet und unter den Aspekten der Realitätsnähe der Simulationsergebnisse und der benötigten Rechenzeit bewertet. Das feinste Netz besteht aus 9614 Elementen, das mittlere Netz beinhaltet 3282 Elemente, und die größte Vernetzung weist 1193 Elemente auf.

Auf Abbildung 16 ist die Einteilung des gesamten Modells in finite Elemente bei mittlerer Verfeinerung unter Verwendung linearer Viereckselemente dargestellt, wie es die Simulationen (5.3-1, 5.3-2, 5.3-3 und 5.3-4) des vorangegangenen Abschnittes erfordern.

Auf Abbildung 17 sieht man in einer Detailvergrößerung die Einteilung des Lotbereichs des Modells in finite Elemente.

Die Elementgröße wird im Lotspalt unter der Komponente und in der Umgebung der Nickel-Passivierungsschicht wesentlich von den hier vorherrschenden geometrischen Randbedingungen (Abb. 15) beeinflußt.

Im Längsschnitt der Lötverbindung weist die Nickel-Passivierungsschicht die kleinste geometrische Dimension auf. Da jedes Material für sich vernetzt werden muß, um eine korrekte FE-Simulation durchführen zu können, bestimmt daher die Breite der Nickel-Passivierungsschicht die Elementgröße in diesem Bereich.

Wird beispielsweise die Nickel-Passivierungsschicht über ihre Breite mit nur einem Element modelliert und fordert man, um die Stabilität der Simulationsrechnungen nicht zu gefährden, daß die Elemente ein Seitenverhältnis von 8:1 nicht überschreiten, so legt man damit bereits die Elementgrößen in dessen Umgebung fest.

Die Erfüllung dieser Bedingungen an das Element-Seitenverhältnis ist insbesondere wichtig in den Bereichen des Modells, in denen große Dehnungen in Richtung der Elementseiten zu erwarten sind.

Eine weitere geometrische Randbedingung ergibt sich aus der Forderung, daß jeder Winkel in den Viereckselementen größer oder gleich 45° sein soll. Jeder Winkel in den Dreieckselementen soll größer oder gleich 30° sein. Die Erfüllung dieser Verzerrungsrandbedingungen ist insbesondere wichtig in den Bereichen des Modells, in denen große Gleitungen zu erwarten sind, da anderenfalls in diesen Bereichen numerische Instabilitäten auftreten könnten.

Unter Beachtung dieser Qualitätsanforderungen an die generierten Elemente und unter Benutzung des Netzgenerators von I-DEAS wird das Modell der Lötverbindung vernetzt. Etwa 10% der vom automatischen Netzgenerator erzeugten Elemente erfüllten die Qualitätsanforderungen nicht. Nach Korrektur dieser Elemente "mit der Hand" genügten schließlich alle Elemente den Qualitätsanforderungen.

Das so vernetzte, mittelfeine Modell besteht aus 3282 Elementen. Die Komponente wird im Bereich des SMC mit 643 Elementen, im Bereich des Silbers mit 551 und im Bereich des Nickels mit 170 Elementen modelliert. Die Leiterplatte wird in 606 Elemente und die

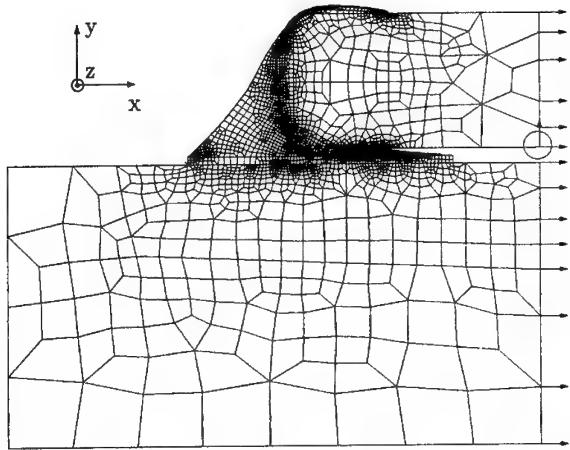


Abbildung 16: Gesamtdarstellung der Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung bei mittelfeiner Vernetzung unter Verwendung linearer Viereckselemente

Lötlandefläche in 410 Elemente unterteilt. Der für die Simulation wichtigste Bereich, der Lotbereich, wird mit 902 Elementen modelliert.

Unter Verwendung von linearen Elementansatzfunktionen hat das Modell 3383 Knoten. Daraus ergeben sich 6766 Freiheitsgrade. Also wird für jedes der 2933 Inkremente des mit der Methode der Finiten-Elemente simulierten Temperaturanstiegs ein entsprechend großes nichtlineares Gleichungssystem gelöst. Die CPU-Zeit für diese Simulation beträgt

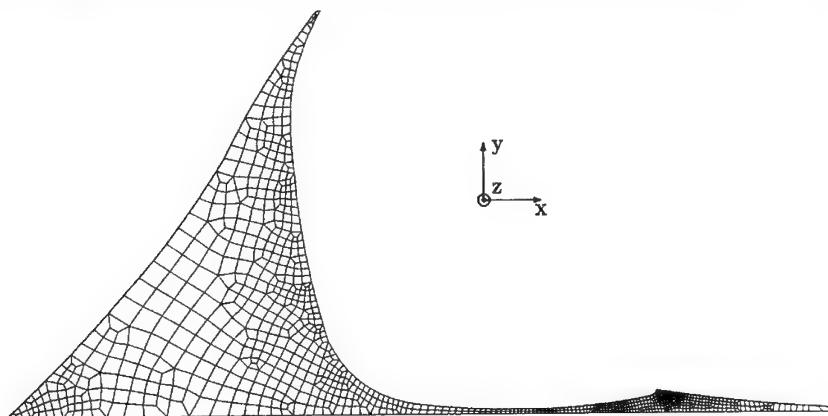


Abbildung 17: Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung im Bereich des Lots bei mittelfeiner Vernetzung unter Verwendung linearer Viereckselemente

auf einer CONVEX CX 220 knapp 2 Tage.

5.5 Simulationsergebnisse

Die grob vernetzte Lötverbindung bringt bereits Simulationsergebnisse hervor, die eine plausible Verteilung der Spannungs- und Dehnungsanteile zeigen. Die Werte unterscheiden sich jedoch noch deutlich von den Simulationsergebnissen zur mittleren Vernetzung. Erst die Simulationsergebnisse der mittleren und der feinen Vernetzung stimmen nahezu überein. Das bedeutet, daß bereits die Simulationsergebnisse bei mittlerer Vernetzung der Lötverbindung hinreichend präzise sind. Eine weitere Verfeinerung liefert bei ungleich höherem Rechenaufwand nur eine marginale Verbesserung in den Simulationsergebnissen und ist deshalb nicht gerechtfertigt. Es genügt also, im folgenden die Simulationsergebnisse bei mittlerer Vernetzung zu betrachten.

Im folgenden wird die zeitliche Entwicklung der mechanischen Abläufe in der Lötverbindung zum einen anhand von Gesamtdarstellungen der Lötverbindung

- durch einen Contourplot der thermischen Dehnungen und
- durch Contourplots der Vergleichsspannungen¹⁷ sowie
- durch Contourplots der Schubspannungen¹⁸

dargestellt.

Zum anderen werden Contourplots

- der Vergleichsspannungen
- der Schubspannungen
- der elastischen Dehnungen,
- der plastischen Dehnungen sowie
- der Kriechdehnungen

des Lot-Teilbereiches beschrieben.

Um eine zeitliche Entwicklung der verschiedenen Dehnungsanteile beurteilen zu können, werden für jede Komponente sowie für die Vergleichs- und Schubspannungen Contourplots zu den Zeitpunkten

- $t_1 = 100\text{ s}$,
- $t_2 = 200\text{ s}$,

¹⁷vgl. Anhang unter *Vergleichsspannung*

¹⁸vgl. Anhang unter *Schubspannung*

- $t_3 = 900\text{ s}$ und
- $t_4 = 1200\text{ s}$

verglichen.

In allen Contourplots zeigt die schwarze, durchgezogene Linie in der Nähe der Berandung des dargestellten Bereiches die unverformte Geometrie des dargestellten Bereiches.

Die Berandung der Graustufen bzw. der Farbbereiche stellt die verformte Geometrie dar. Dabei ist die Verformung, wenn nicht anders angegeben, um das 50-fache vergrößert dargestellt, um einen besseren Eindruck von der Ausprägung der Verformung zu erhalten.

Wenn nicht anders angegeben, bedeutet im folgenden z.B. $\min \sigma_{xy}$ den betragsmäßig größten negativen Wert von σ_{xy} und nicht etwa, unabhängig vom Vorzeichen, den betragsmäßig kleinsten Wert von σ_{xy} . Das gleiche gilt für alle anderen dargestellten Ergebniskomponenten entsprechend.

Die angegebenen Skalen neben den Contourplots sind jeweils individuell für jeden Plot verschieden.

5.5.1 Simulationsergebnisse: Die thermischen Dehnungen

Die unterschiedlichen Temperaturausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien haben unterschiedliche thermische Dehnungen der verschiedenen Bereiche der Lötverbindung zur Folge. Die thermischen Dehnungen nehmen proportional zur Temperatur zu Gl. (8). Für eine beliebige, aber feste Temperatur, ist die Temperaturdehnung bezogen auf einen der geometrischen Bereiche PCB, Cu, Ni, Ag und SMC konstant. Abbildung 18 zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch für die horizontalen thermischen Dehnungen zur Zeit $t=1200\text{ s}$ und bei einer Temperatur von 80°C . Das Bild für die vertikalen thermischen Dehnungen entspricht diesem exakt. Die thermischen Schubdehnungen verschwinden, wie aus dem zugrundeliegenden Materialgesetz Gl. (8) abgelesen werden kann.

Für jeden Materialbereich gilt der folgende Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Temperaturausdehnungskoeffizient:

$$\varepsilon_{T,\text{Material}} = \alpha_{T,\text{Material}} \cdot \Delta T \quad (8)$$

Das Verhältnis der thermischen Dehnungen der verschiedenen Materialien zueinander ändert sich bei Temperaturänderungen nicht. Insbesondere ist es also gegenüber der Temperatur und der Zeit invariant. Deshalb genügt hier eine Abbildung 18 zur Verdeutlichung der thermischen Dehnungen. Deutlich sind die fünf Grenzflächen zu sehen, die durch ihr Thermobimetall-Verhalten für das Entstehen thermischer Spannungen in der Lötverbindung verantwortlich sind.

Das Ausmaß der thermischen Spannungen in den Grenzflächen wird durch die Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der an den Grenzen zusammen treffenden Materialien bestimmt. Die folgende Aufzählung gibt Aufschluß über die an den fünf Grenzflächen zusammen treffenden Materialien. In Klammer ist jeweils das Verhältnis der thermischen Ausdehnungskoeffizienten (vgl. Tabelle 3) der Materialpaarungen angegeben:

1. Leiterplatte — Kupfer-Landefläche (1:1,12)
2. Kupfer-Landefläche — Lot (1:1,25)
3. Lot — Nickel-Passivierungsschicht (1,58:1)
4. Nickel-Passivierungsschicht — Silber (1:1,48)
5. Silber — Komponente (3,28:1)

Hieraus resultiert der für eine Lötverbindung charakteristische Spannungs- bzw. Dehnungszustand.

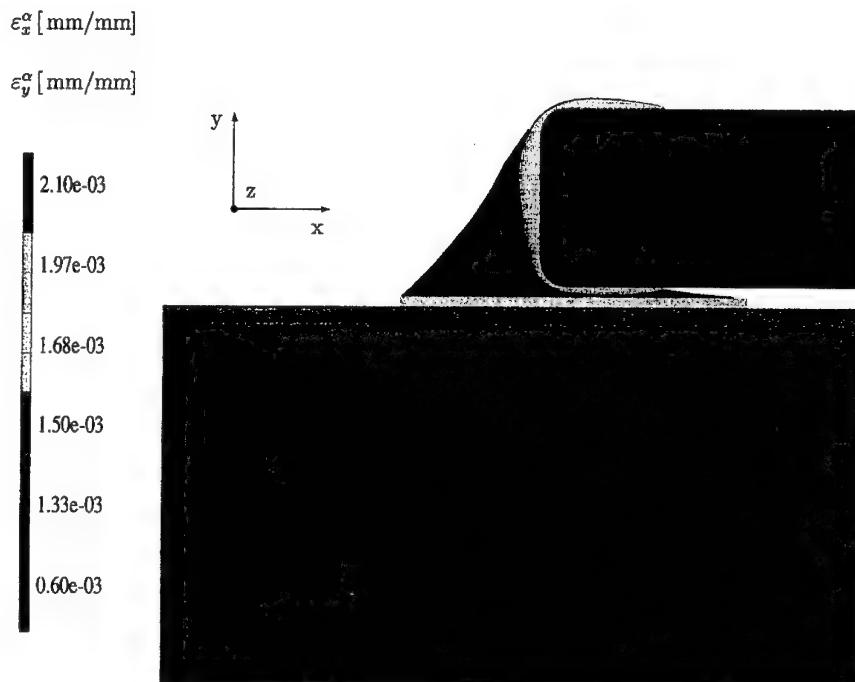


Abbildung 18: Gesamtdarstellung der thermischen Dehnungen in horizontaler/ vertikaler Richtung zur Zeit $t = 1200$ s bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$ bei ungehinderter Ausdehnung

5.5.2 Simulationsergebnisse: Die Spannungen

5.5.2.1 Ein Überblick über die von Mises Vergleichsspannungen ist auf den Abbildungen 19 und 20 zu sehen. Die Vergleichsspannungen erreichen bei Betriebstemperatur ihre maximalen Werte um 300 GPa im Bereich der Kontaktkappe der Komponente. Mit zunehmender Temperatur wachsen die Vergleichsspannungen in fast allen Bereichen monoton an. Nur im Bereich Lot ist ein hiervon abweichendes Verhalten zu beobachten.

5.5.2.2 Die Vergleichsspannungen im Lotteilbereich sind in Detail-Contourplots exemplarisch auf den Abbildungen 21 und 22 zu sehen. Die bezeichneten vier Knoten — 1, 3 und 4 sowie 2 — markieren typische Orte, an denen im Verlauf der Simulation maximale Spannungen auftreten.

Betrachtet man die Vergleichsspannungen nach Ablauf der Simulationszeit von 1200 s (siehe Abbildung 22), so erkennt man, daß sich die Spannungen im Bereich Lot durch Plastifizieren und Kriechen nahezu abgebaut haben. Für die an den Materialgrenzen zum Kupfer auf der einen und zum Nickel auf der anderen Seite auf Abbildung 22 erkennbaren höheren Vergleichsspannungen gilt das in Abschnitt 5.5.3 beschriebene.

5.5.2.3 Einen Überblick über die Schubspannungen in der Darstellungsebene geben die Abbildungen 23 – 26. Legt man gedanklich Abbildung 15 auf Abbildung 23, so erkennt man deutlich eine Schubspannungskonzentration links vorne unter der Komponente¹⁹. Dort werden Schubspannungswerte bis zu 24 MPa erreicht.

An diesen vier Contourplots läßt sich die Verformung in der Lötverbindung während des Temperaturanstiegs sehr gut nachvollziehen. Wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, deutet die durchgezogene, schwarze Linie die unverformte Geometrie der Lötverbindung an. Die Verformung ist relativ zur Größe dieser Contourplots um 50-fach vergrößert dargestellt. Die rechte untere Ecke des SMC ist der einzige Fixpunkt wie in Abschnitt 5.2 beschrieben und auf Abbildung 15 zu sehen.

Aufgrund der symmetrischen Randbedingungen können sich die Knoten an der rechten Seite von SMC und PCB nur vertikal verschieben. Das bedeutet, daß sich bei zunehmender Erwärmung die SM Komponente ausdehnt und ihre obere rechte Ecke nach oben wandert. Genauso dehnt sich das PCB aus, und seine untere rechte Ecke wandert nach unten.

Der linke obere Punkt der Leiterplatte erfährt einen komplexeren Verschiebungsgang: Bis etwa 200 s nach Beginn des Temperaturanstiegs wird er nach schräg links oben verschoben. Nach 900 s hat sich seine Linksverschiebung weiter vergrößert; die vertikale Verschiebungskomponente ist jedoch auf den Ausgangswert zurückgegangen und verbleibt während der letzten 300 s dort, während sich seine Linksverschiebung weiter erhöht.

5.5.2.4 Die Schubspannungen in der Darstellungsebene im Lotteilbereich sind auf den Abbildungen 27 und 28 zu sehen. In diesen Contourplots wird deutlich, daß sich die Schubspannungen vorwiegend in der Umgebung der Knoten 3 und 4 links vorne unter der Komponente in unmittelbarer Umgebung der Grenzfläche zwischen Lot

¹⁹vgl. roter Bereich innerhalb des Rechtecks 'A' auf Abbildung 23

und Nickel-Passivierungsschicht konzentrieren. In den Umgebungen des Knotens 1 und des Knotens 4 sind weitere Bereiche von Schubspannungskonzentrationen festzustellen. In den genannten Bereichen steigen die Schubspannungen über den gesamten Simulationszeitraum hinweg. Die Ausdehnung der Bereiche wird dabei zunehmend kleiner.

5.5.2.5 Einen Überblick über die Lotbereiche mit maximalen von Mises Spannungen sowie über Lotbereiche extremer Schubspannungen in der Darstellungsebene über alle Zeiten t mit $t \in \{100\text{s}, 200\text{s}, 900\text{s}, 1200\text{s}\}$ gibt die Abbildung 29. Die verschiedenen Bereiche sind markiert durch verschiedenfarbige Punkte. In der Legende der Abbildung ist festgehalten, welche Farben welche Spannungskomponenten repräsentieren. Beispielsweise geben alle grünen Knoten Orte an, an denen die von Mises Vergleichsspannung groß wird. Da es vorkommt, daß an einem Knoten nicht nur eine Komponente (hier die Vergleichsspannung) groß wird, sondern noch eine oder mehrere andere Komponenten an dieser Stelle Extremwerte annehmen, können diese Knoten Sektoren mehrerer Farben aufweisen.

Im wesentlichen gibt es drei verschiedene Bereiche extremer Spannungen:

1. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 3 und 4 links unter dem SMC: Hier werden die von Mises Spannungen und die negativen Schubspannungen maximal.
2. Der Bereich in der Umgebung von Knoten 1 oben im Solder-Fillet²⁰: In diesem Bereich werden die von Mises Spannungen und die Schubspannungen maximal.
3. Der Bereich um den Knoten 2 unter dem SMC: Auch in diesem Bereich werden die von Mises Spannungen und die Schubspannungen maximal.

²⁰vgl. *Solder-Fillet* im Anhang

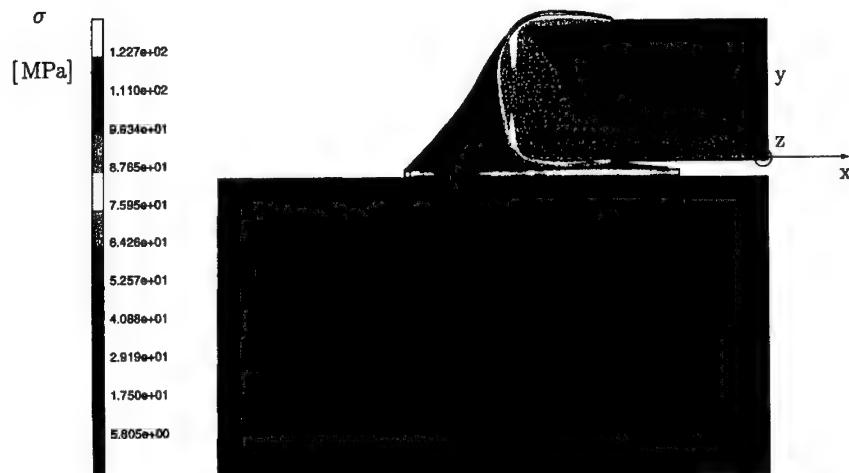


Abbildung 19: Übersicht über die von Mises Vergleichsspannungen σ zur Zeit $t = 100\text{s}$ bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

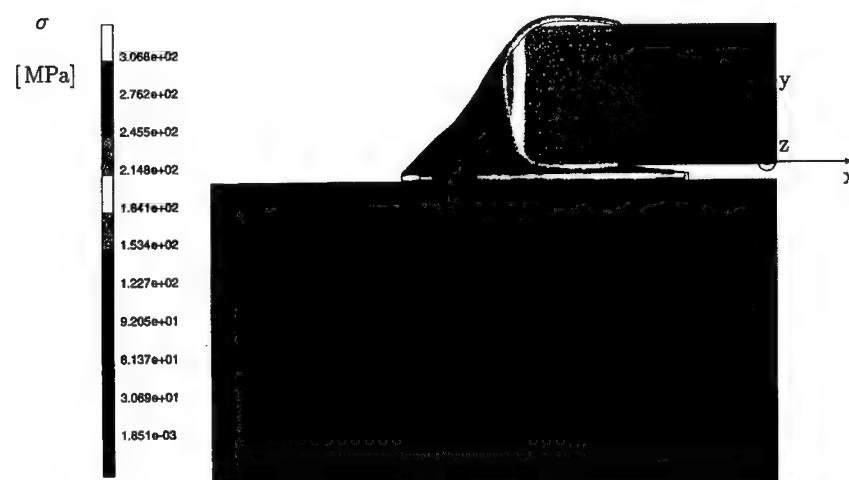


Abbildung 20: Übersicht über die von Mises Vergleichsspannungen σ zur Zeit $t = 1200\text{s}$ bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

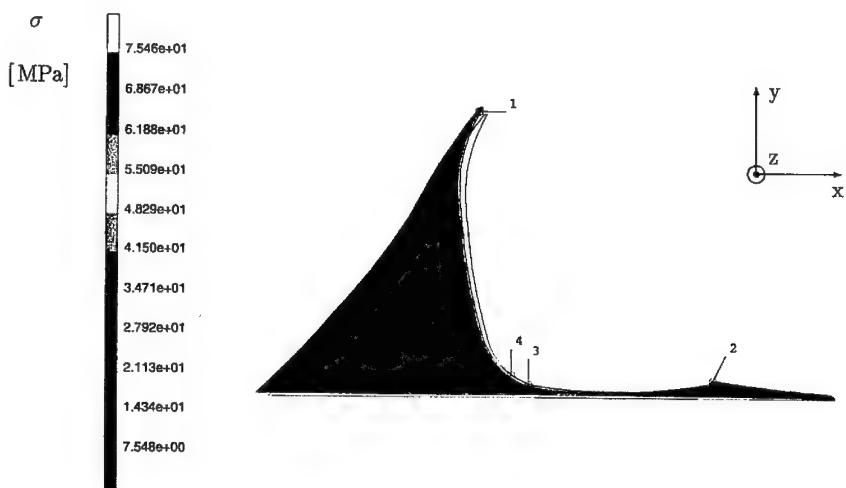


Abbildung 21: Von Mises Vergleichsspannungen σ im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 100$ s bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

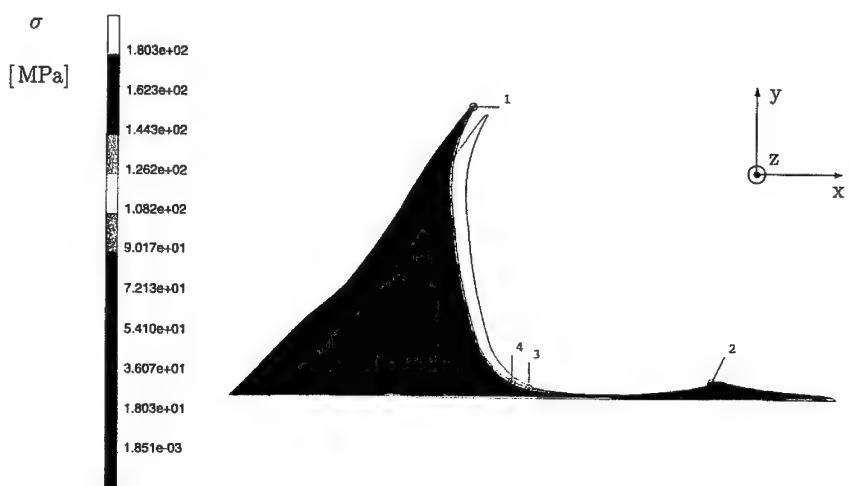


Abbildung 22: Von Mises Vergleichsspannungen σ im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 1200$ s bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

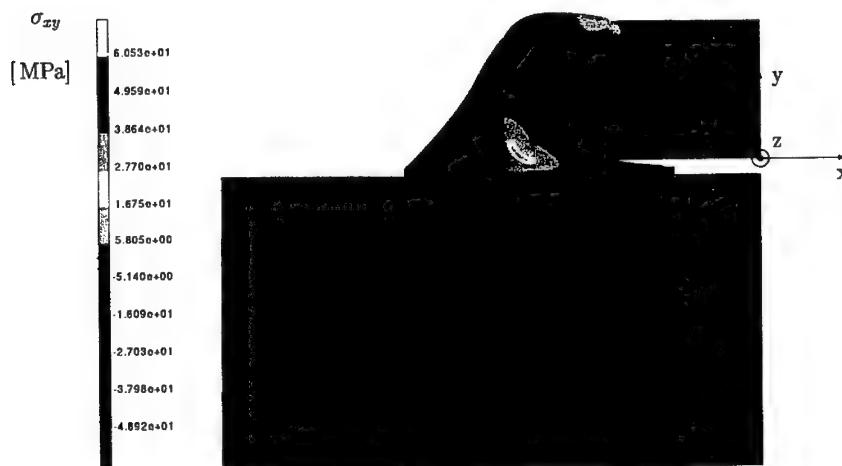


Abbildung 23: Übersicht über die Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene zur Zeit $t = 100$ s bei einer Temperatur von $+19$ °C

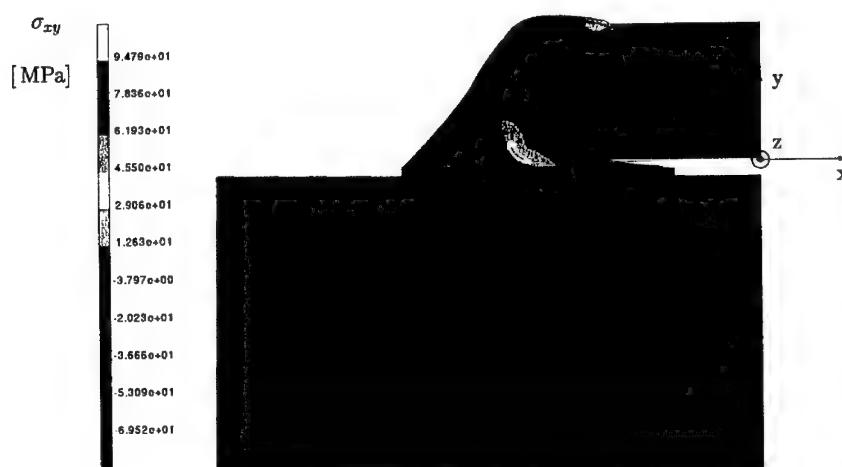


Abbildung 24: Übersicht über die Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene zur Zeit $t = 200$ s bei einer Temperatur von $+43$ °C

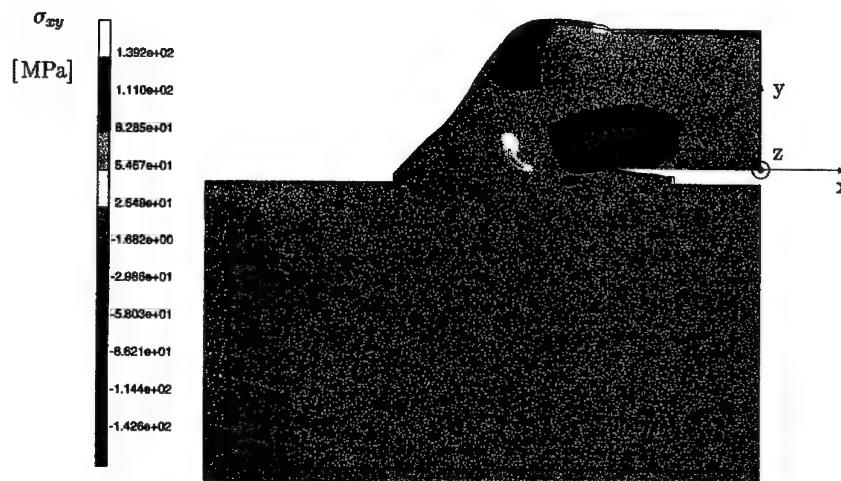


Abbildung 25: Übersicht über die Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene zur Zeit $t = 900$ s bei einer Temperatur von $+79^\circ\text{C}$

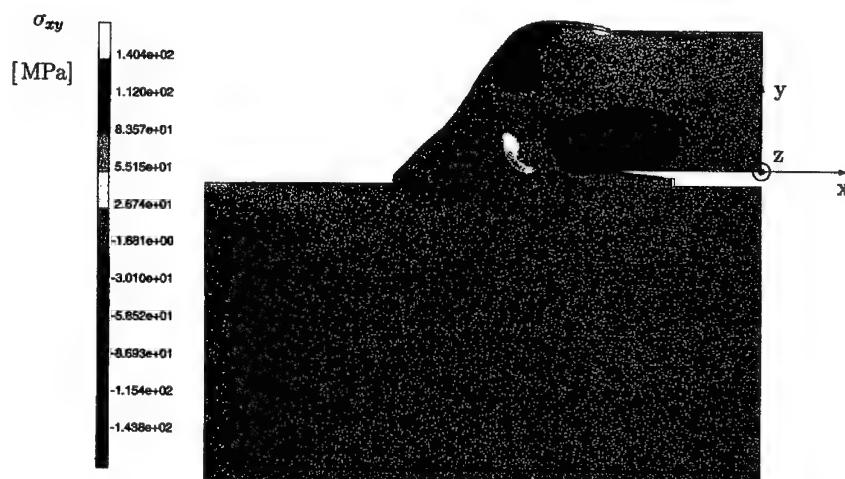


Abbildung 26: Übersicht über die Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene zur Zeit $t = 1200$ s bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

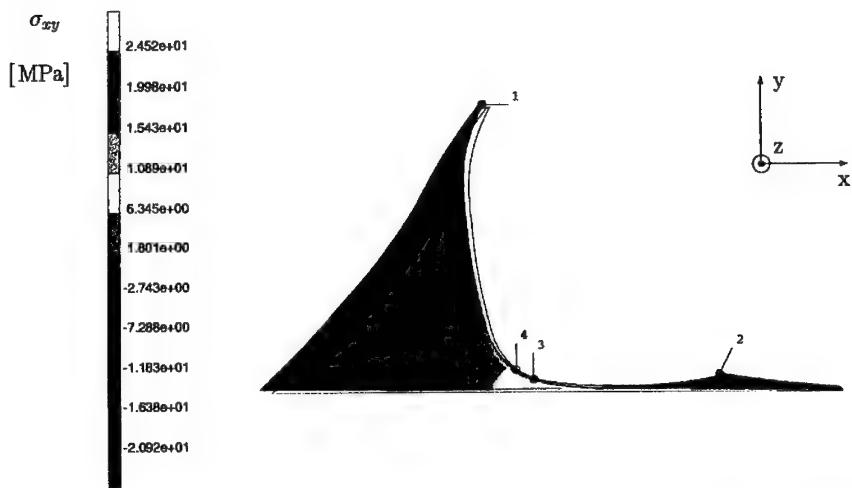


Abbildung 27: Contourplot der Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 100$ s bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

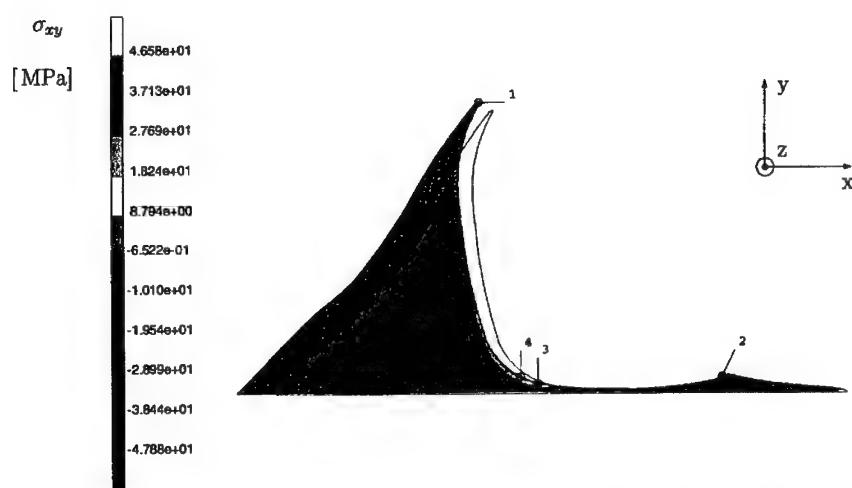


Abbildung 28: Contourplot der Schubspannungen σ_{xy} in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 1200$ s bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

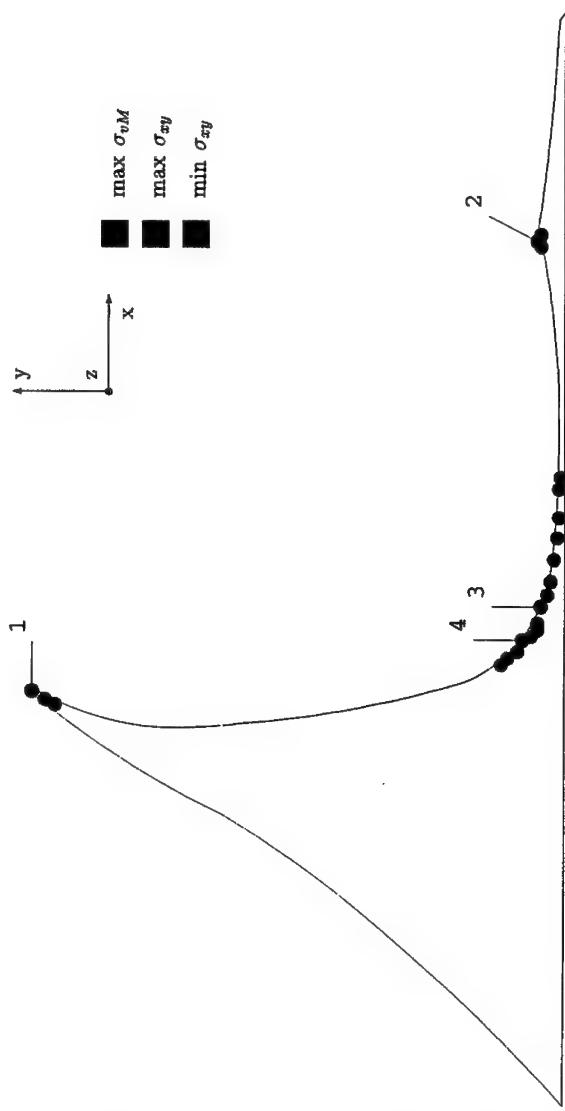


Abbildung 29: Lotbereiche mit maximalen von Mises Spannungen sowie mit extremen Schubspannungen in der Darstellungsebene über alle Zeiten t mit $t \in \{100s, 200s, 900s, 1200s\}$

5.5.3 Simulationsergebnisse: Die elastischen Dehnungen

5.5.3.1 Die elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 30 und 31 auf den folgenden Seiten dargestellt. Betrachtet man die elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung (ε_x^e), so erkennt man, daß die Bereiche, die gestreckt werden, von $t = 0\text{ s}$ bis zur Zeit $t = 100\text{ s}$ zunehmen. Sie erreichen ihr Maximum von 0,1 % elastischer Dehnung in der Umgebung der Knoten 33 und 34 vor dem SMC in der Nähe der Materialgrenze zum Nickel und in der Umgebung des Knotens Nr. 40 in der Lotkehle.

Das Lotmaterial in der Umgebung der Knoten 61, 63, 65 und 70 wird gestaucht. Dieser Bereich wird von $t = 0\text{ s}$ bis $t = 200\text{ s}$ zunehmend größer. Die maximale elastische Stauchung in horizontaler Richtung von -0,05 % wird in der Lotkehle in der Umgebung des Knotens 70 angenommen.

Danach nehmen die elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung schnell ab und haben im Vergleich zu den anderen Dehnungsanteilen praktisch keine Bedeutung mehr. Gleichzeitig werden auch die Dehnungsgradienten in horizontaler Richtung sehr klein.

5.5.3.2 Die elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung (ε_y^e) bleiben die ganze Zeit unter 0,1 % und sind somit vernachlässigbar klein.

5.5.3.3 Ein Überblick über die elastischen Schubgleitungen ist auf den Abbildungen 32 und 33 zu sehen. Die elastischen Schubgleitungen²¹ in der Darstellungsebene konzentrieren sich auf fünf Punkte der Lötverbindung. Auf die vier "Eckpunkte" der Kontaktkappe des SMC und auf die rechte untere Ecke der Grenzfläche zwischen Kupfer-Landefläche und PCB.

5.5.3.4 Die elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene im Bereich des Lotes sind auf den Abbildungen 34 – 37 dargestellt. Die elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene (ε_{xy}^e) wachsen bis zur Zeit $t = 200\text{ s}$ an und erreichen hier ihr Maximum von fast $3 \cdot 10^{-3}$ rad. Dabei wandert das Zentrum des Bereichs des Maximums unter der Komponente — das ist die Umgebung um die Knoten 94 und 96 — langsam von Knoten 94 in Richtung Knoten 96. Nach diesem Maximum klingen die Schubgleitungen langsam ab, um schließlich nach einer Zeit von 900 s und länger bedeutungslos gegenüber den anderen Dehnungsanteilen zu werden. Wie bei den anderen beiden elastischen Dehnungskomponenten auch, werden die Dehnungsgradienten im Lotbereich nach $t = 200\text{ s}$ sehr klein.

5.5.3.5 Überblick über die Bereiche extremer elastischer Dehnungen ist auf der Abbildung 38 dargestellt. Im wesentlichen gibt es vier verschiedene Bereiche extremer elastischer Dehnungen.

1. Der Bereich vor dem SMC in der Umgebung der Knoten 31, 33 und 34. Hier erreichen

²¹vgl. *Schubgleitung im Anhang*

die elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ihr positives und die elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ihr negatives Maximum.

2. Der Bereich vorn links unter dem SMC in der Umgebung der Knoten 94 und 96. Hier erreichen die elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene ihr positives Maximum.
3. Der Bereich weiter rechts unter dem SMC in der Umgebung der Knoten 61, 63, 65 und 70. Hier erreichen die horizontalen Dehnungen ihr negatives und die vertikalen Dehnungen ihr positives Maximum.
4. Der Bereich in der Lotkehle in der Umgebung des Knotens 40. Hier erreichen die elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung in enger Nachbarschaft sowohl positive als auch negative maximale Werte und die vertikalen Dehnungen erreichen ihr positives Maximum. Die elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene nehmen ihr negatives Maximum an.

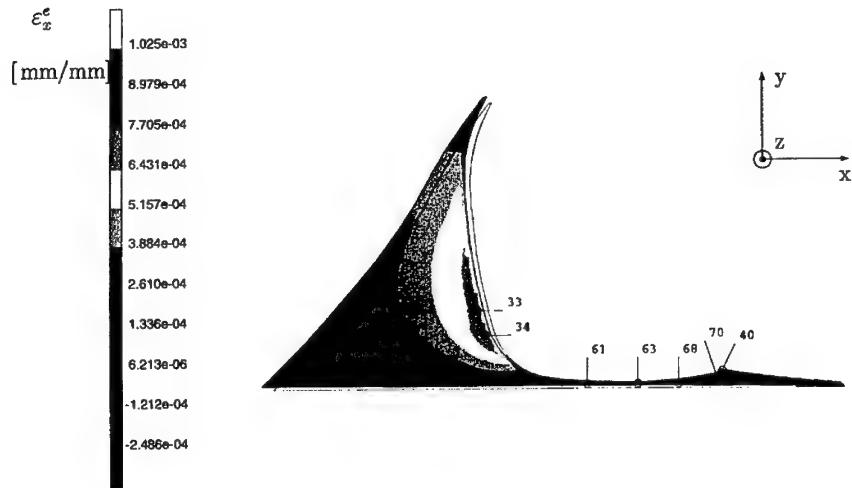


Abbildung 30: Contourplot der elastischen Dehnungen ε_x^e in horizontaler Richtung im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 100$ s bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

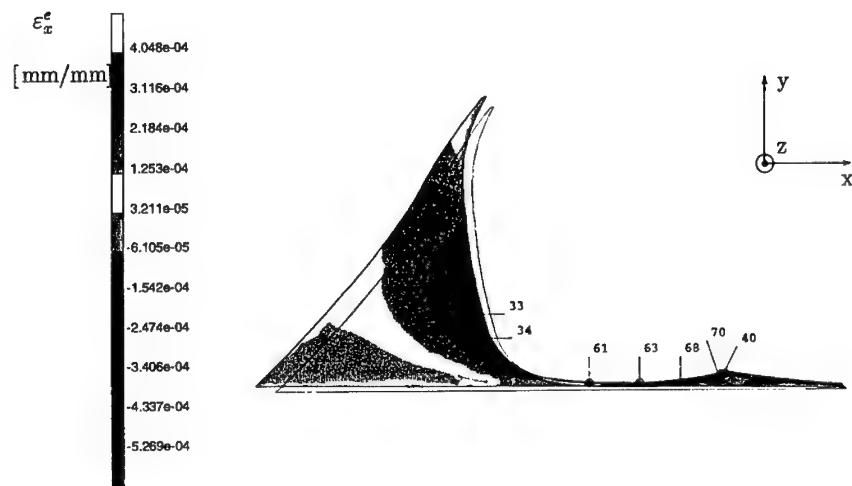


Abbildung 31: Contourplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 200$ s bei einer Temperatur von 43°C

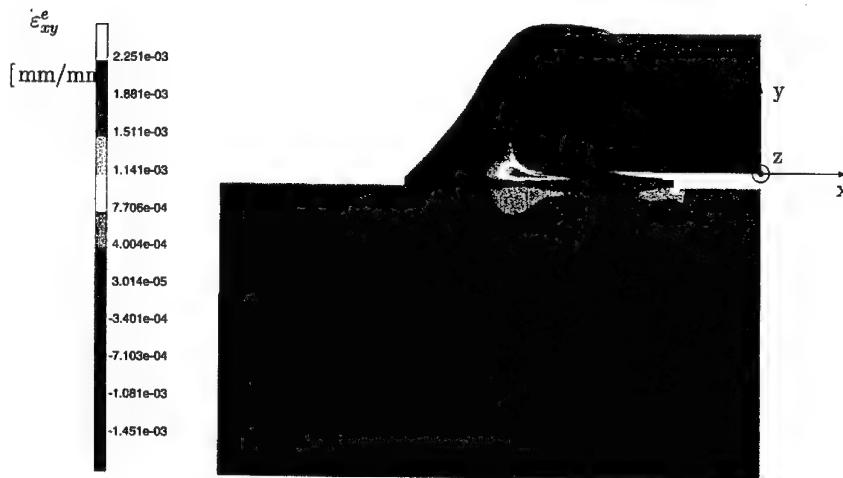


Abbildung 32: Übersicht über die elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e zur Zeit $t = 100\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

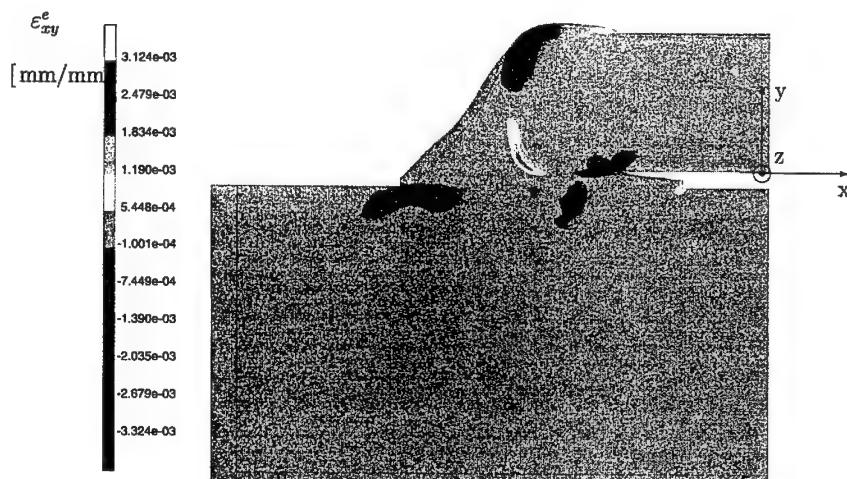


Abbildung 33: Übersicht über die elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e zur Zeit $t = 1200\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

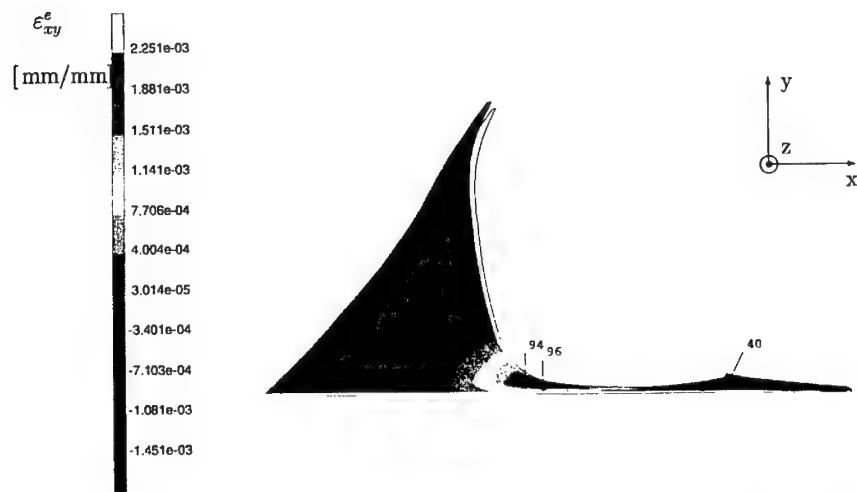


Abbildung 34: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ϵ_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 100\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+19^\circ\text{C}$

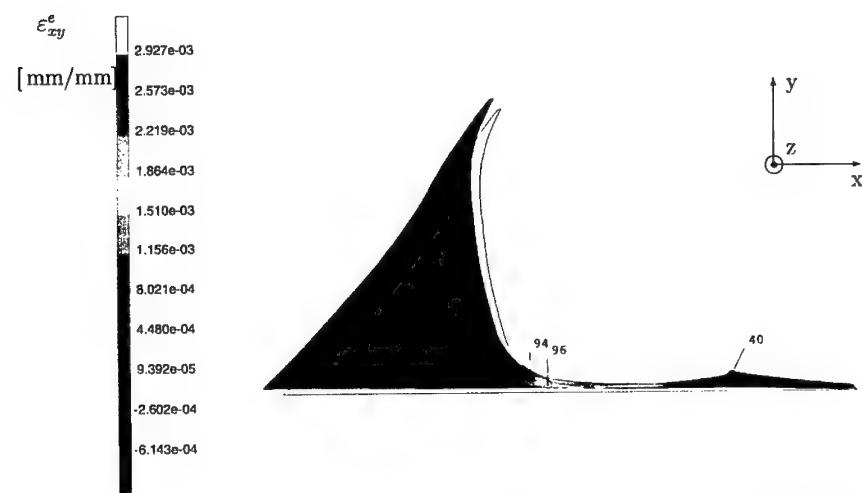


Abbildung 35: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ϵ_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 200\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+43^\circ\text{C}$

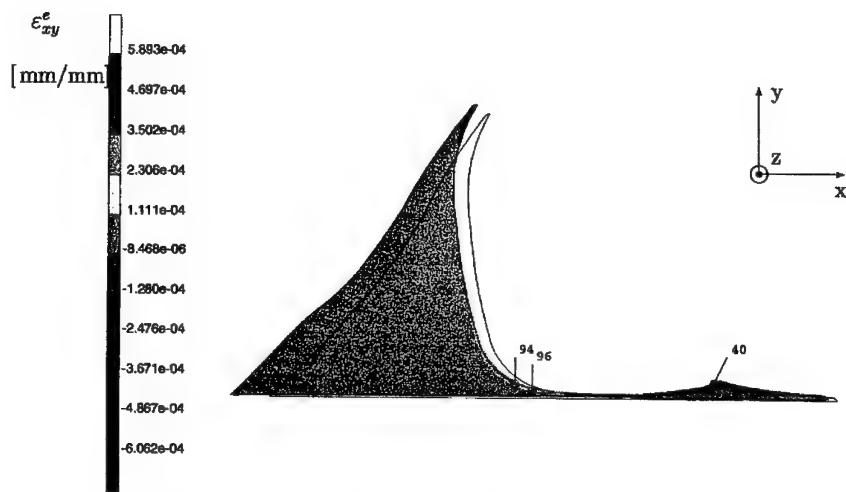


Abbildung 36: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 900\text{s}$ bei einer Temperatur von $+79^\circ\text{C}$

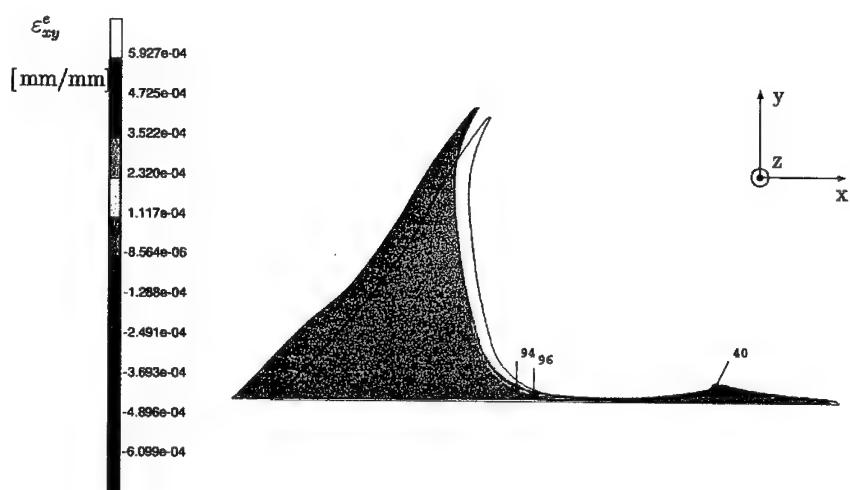


Abbildung 37: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 1200\text{s}$ bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

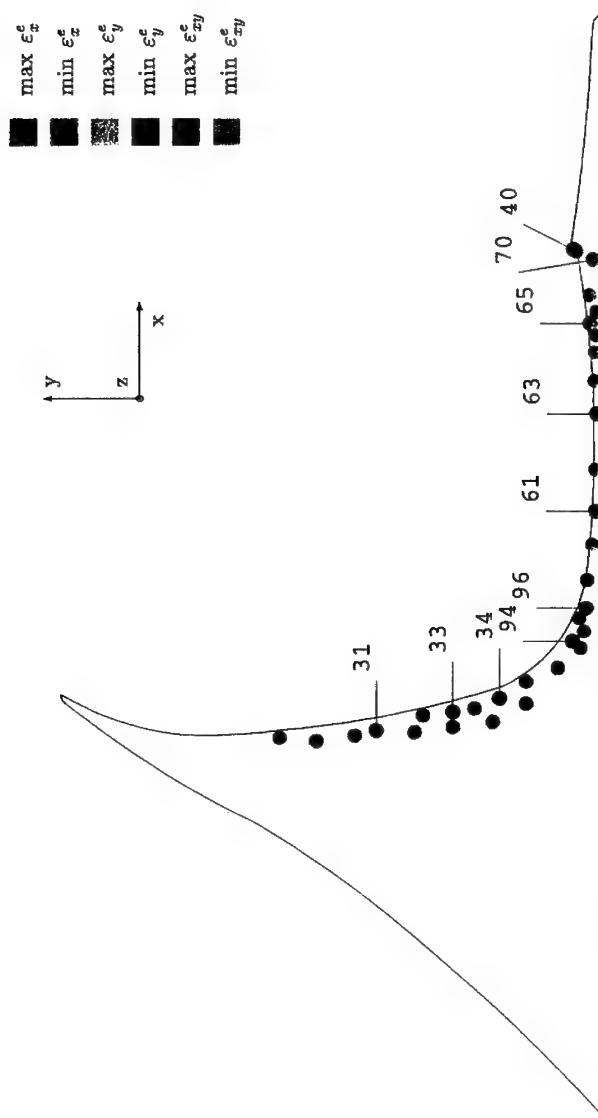


Abbildung 38: Lotbereiche mit extremen elastischen Dehnungen über alle Zeiten t mit $t \in \{100\text{s}, 200\text{s}, 900\text{s}, 1200\text{s}\}$

5.5.4 Simulationsergebnisse: Die plastischen Dehnungen

Für die plastischen Dehnungen in die Koordinatenrichtungen und für die plastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene gilt: Sie beginnen in der Umgebung von Knoten 120 unterhalb der Kappe des SMC. Dieser Bereich dehnt sich im Verlauf der Zeit aus und umfasst schließlich auch die Umgebung um die Knoten 61, 11 und 121.

Da sich die plastischen Dehnungen auf einen relativ kleinen Teilbereich des Lotbereiches konzentrieren, ist der entsprechende Gradient in diesem Teilbereich relativ groß. Im übrigen Lotbereich ist der Gradient genauso wie die plastischen Dehnungen gleich Null.

5.5.4.1 Die plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung sind auf der Abbildung 39 dargestellt. Die plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung erreichen Werte bis zu $7 \cdot 10^{-8}$. Die absoluten Werte sind also während des gesamten Temperaturanstiegs klein, aber sie sind von großer Bedeutung, da sie vielfach Zentren weiteren Kriechens sind. Man kann zwei verschiedene Bereiche unterscheiden: Zum einen den großen Bereich unterhalb des SMC in der Umgebung der Knoten 61, und 111 sowie den kleineren Bereich in der Umgebung des Knotens 100.

5.5.4.2 Die plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung bleiben mit einer maximalen Dehnung von $2,8 \cdot 10^{-4}$ klein, sind aber genauso wie die in horizontaler Richtung Zentren weiterer Kriechverformungen im Lotmaterial. Sie treten in der Umgebung der Knoten 120 und 121, also an den selben geometrischen Orten wie die Schubgleitungen in der Darstellungsebene (vgl. Abb. 40 dort), auf.

5.5.4.3 Die plastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene sind auf der Abbildung 40 dargestellt. Die plastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene erreichen in der Umgebung der Knoten 120 und 121 ein Maximum von fast $1,7 \cdot 10^{-3}$ rad, also weniger als $0,1^\circ$. Im Vergleich zur Summe aller Schubgleitungsanteile ist dies ein kleiner, aber wichtiger Wert, da nur mit seiner Hilfe die Berechnung der Kriechverformung des Lotmaterials korrekt möglich ist.

5.5.4.4 Ein Überblick über Bereiche extremer plastischer Dehnungen ist auf der Abbildung 41 dargestellt. Im wesentlichen gibt es zwei verschiedene Bereiche extremer plastischer Dehnungen.

1. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 61, 111, 120 und 121: In diesem Bereich nehmen die horizontalen plastischen Dehnungen ihr negatives Maximum an. Gleichzeitig werden in diesem Bereich die vertikalen plastischen Dehnungen sowie die plastischen Schubgleitungen maximal.
2. Der Bereich in der Umgebung des Knotens 100: In diesem Bereich nehmen die horizontalen plastischen Dehnungen ihr positives Maximum an.

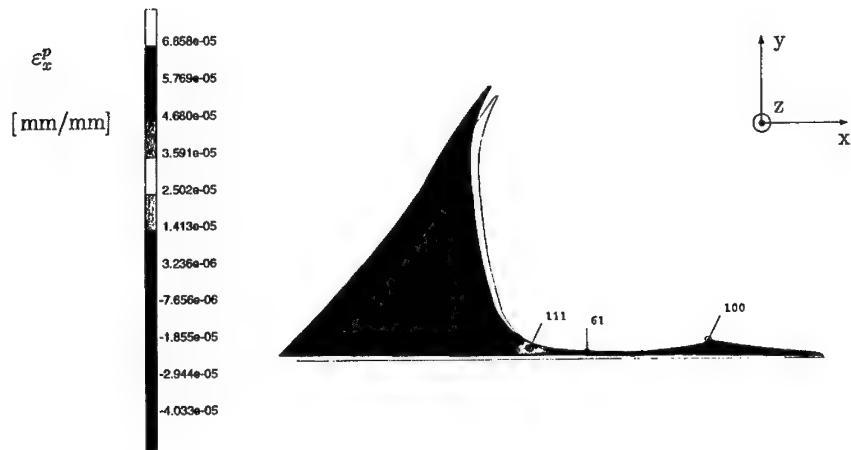


Abbildung 39: Contourplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 200 \text{ s}$ bei einer Temperatur von $+43^\circ\text{C}$

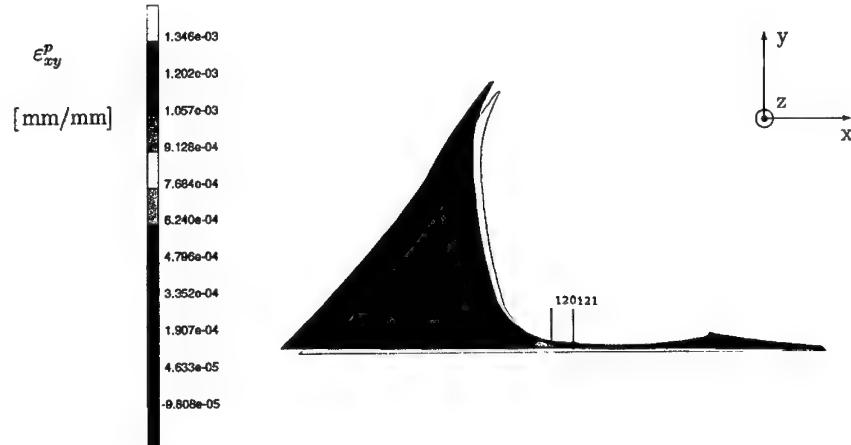


Abbildung 40: Contourplot der plastischen Schubgleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 200 \text{ s}$ bei einer Temperatur von $+43^\circ\text{C}$

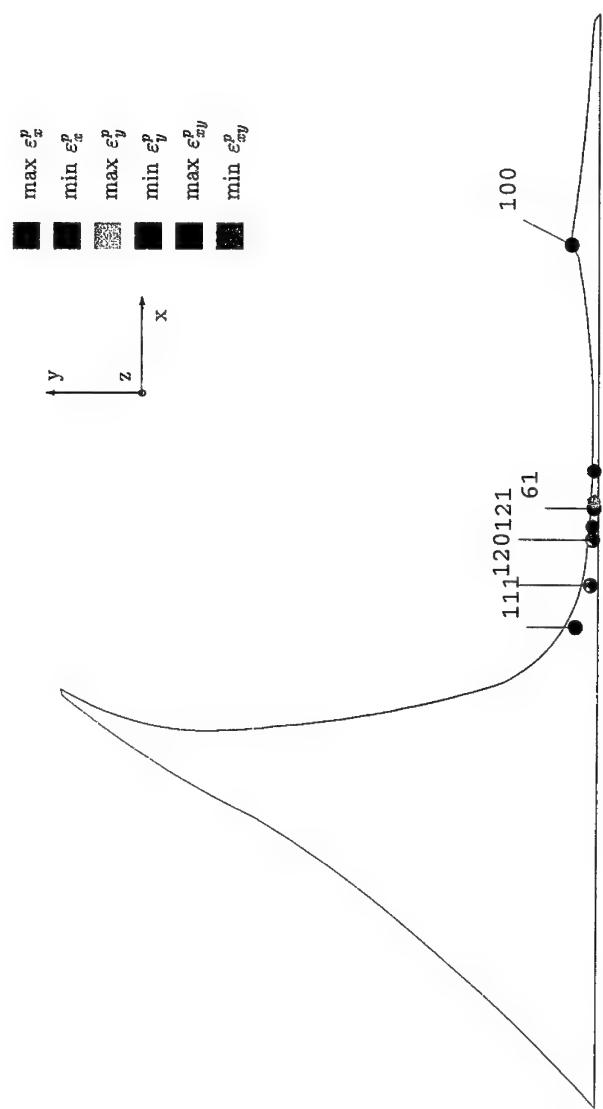


Abbildung 41: Lotbereiche mit extremen plastischen Dehnungen über alle Zeiten t mit $t \in \{100\text{s}, 200\text{s}, 900\text{s}, 1200\text{s}\}$

5.5.5 Simulationsergebnisse: Die Kriechdehnungen

Die Kriechdehnungen tragen am meisten zu der Gesamtdehnung bei. Sie werden in jeder Komponente $\varepsilon_{cr,x}$, $\varepsilon_{cr,y}$ und $\varepsilon_{cr,xy}$ mit voranschreitender Zeit und zunehmender Temperatur größer.

Die Anteile der Kriechdehnungen an der Gesamtdehnung dominieren ab etwa $t = 200\text{ s}$ bis zum Schluß der Simulation zum Zeitpunkt $t = 1200\text{ s}$.

5.5.5.1 Die Kriechdehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 42 und 43 auf den folgenden Seiten dargestellt. Der Bereich maximaler positiver Kriechdehnungen lässt sich in der Umgebung der Knoten 30, 32, 35, 38, 142 und 143 lokalisierten. Nach längerer Simulationszeit — nach 900 Sekunden wird es schon deutlich und nach 1200 Sekunden unübersehbar — verlagert sich dieser Bereich derart, daß er den dreiecksförmigen Lotbereich vor dem SMC — das Fillet — im Winkel von ca. 18° in zwei Bereiche aufteilt. In der Umgebung dieses das Fillet teilenden Geraden wird das Lotmaterial bis zu maximal 1,25% gestreckt.

Ein Bereich fast gleich großer negativer Kriechdehnungen ist in der Umgebung der Knoten 136 und 137 im Bereich der Lotkehle festzustellen. Hier wird das Lotmaterial durch die praktisch unter ihm nach links weggezogene Leiterplatte gestaucht. Gleichzeitig liegt in unmittelbarer Nähe hierzu, ebenfalls im Bereich der Lotkehle, in der Umgebung von Knoten 100 ein weiterer Bereich maximaler positiver Kriechdehnungen. In horizontaler Richtung ist somit der Gradient der Kriechdehnungen in der Lotkehle am größten.

5.5.5.2 Die Kriechdehnungen in vertikaler Richtung sind auf der Abbildung 44 dargestellt. Die vertikalen Kriechdehnungen sind vom Betrag unwesentlich größer als die horizontalen. Die positiven Extrema treten in der Umgebung der Knoten 62, 65, 69, 136, 137 und 151 unter dem SMC im Lotspalt auf.

Extrem negative vertikale Kriechdehnungen treten im Bereich in der Umgebung des Knotens 100 in der Lotkehle und im Bereich in der Umgebung der Knoten 142 und 143 vorn links unter der Kappe des SMC auf. Letzterer Bereich teilt — wie schon die maximalen positiven Kriechdehnungen in horizontaler Richtung — das Fillet unter einem Winkel von ca. 18° in zwei Bereiche.

5.5.5.3 Die Kriechgleitungen in der Darstellungsebene sind auf der Abbildung 45 dargestellt. Die Kriechgleitungen sind im Vergleich zu den elastischen und plastischen Gleitungen in der Darstellungsebene wesentlich größer. Die Kriechgleitungen erreichen bei $t = 900\text{ s}$ einen Wert von maximal 0,15 rad, also $\approx 8,6^\circ$. In den verbleibenden 300 s bis Simulationsende ($t = 1200\text{ s}$) werden sie nur noch unwesentlich größer und erreichen schließlich ihren maximalen Wert von $\approx 8,7^\circ$.

Die maximalen positiven Kriechgleitungen konzentrieren sich auf den Bereich des Lotspaltes in der Umgebung der Knoten 60, 62, 96. Ein kleiner Bereich negativer Kriechgleitungen bildet sich in der Umgebung des Knotens 100 aus.

5.5.5.4 Überblick über die Bereiche extremer Kriechdehnungen ist auf der Abbildung 46 dargestellt. Im wesentlichen gibt es sechs verschiedene Bereiche extremer Kriechdehnungen:

1. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 30, 32, 35 und 38: In diesem Bereich nehmen die horizontalen Kriechdehnungen ihr positives Maximum an.
2. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 142 und 143: In diesem Bereich nehmen die horizontalen Kriechdehnungen ihr positives Maximum an. Gleichzeitig nehmen in diesem Bereich die vertikalen Kriechdehnungen negative Extremwerte an.
3. Der Bereich in der Umgebung des Knotens 96: Hier nehmen die Kriechgleitungen in der Darstellungsebene maximale positive Werte an.
4. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 60 und 62 im Lotspalt: Hier nehmen die Kriechgleitungen in der Darstellungsebene maximale positive Werte an. Gleichzeitig sind in diesem Bereich auch die vertikalen Kriechdehnungen maximal.
5. Der Bereich in der Umgebung der Knoten 65, 69, 136, 137 und 151: Das ist der Bereich der maximalen vertikalen Kriechdehnungen.
6. Der Bereich in der Umgebung des Knotens 100: In diesem Bereich nehmen drei verschiedene Kriechdehnungskomponenten extreme Werte an: Die vertikalen Kriechdehnungen nehmen maximale negative Werte an, die horizontalen Kriechdehnungen nehmen ihr positives Maximum an und die Kriechgleitungen in der Darstellungsebene nehmen maximale negative Werte an.

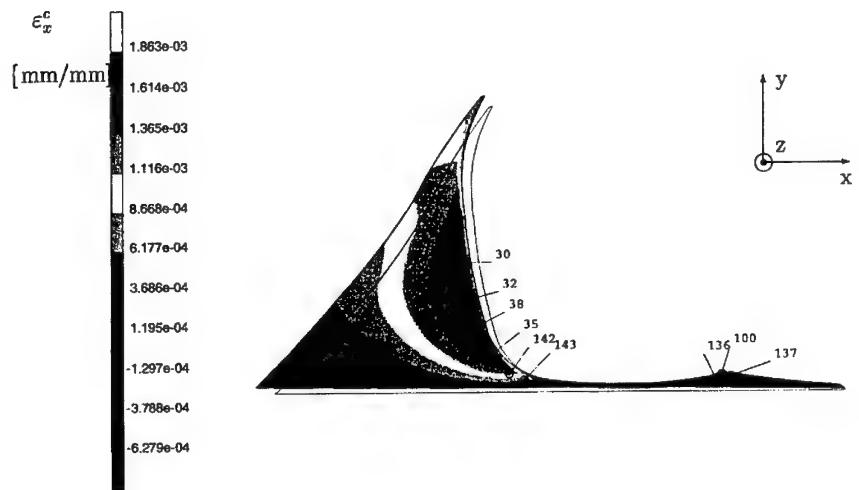


Abbildung 42: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 200\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+43\text{ }^\circ\text{C}$

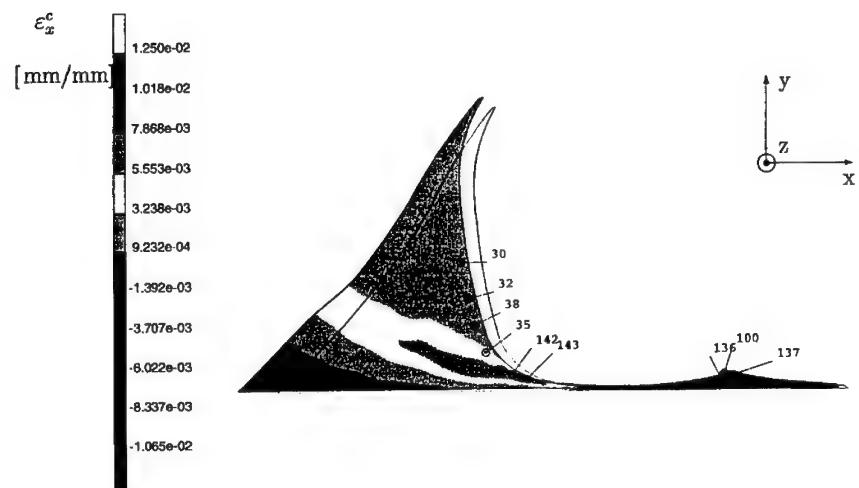


Abbildung 43: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 1200\text{ s}$ bei einer Temperatur von $+80\text{ }^\circ\text{C}$

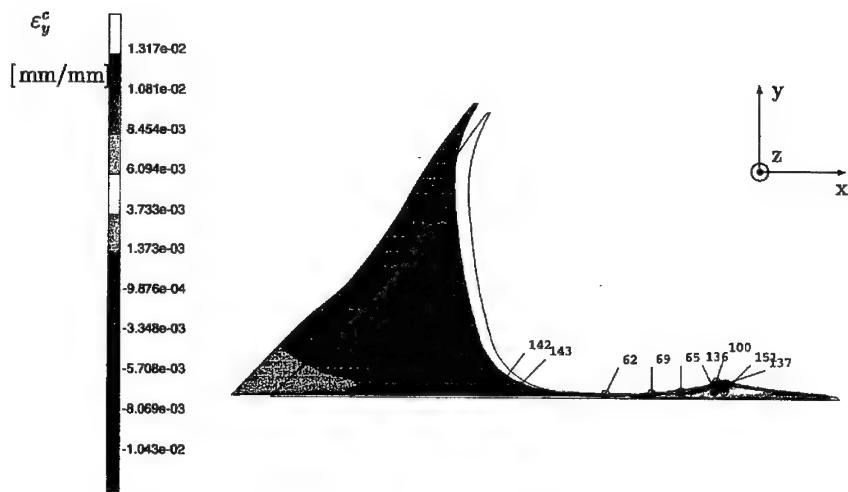


Abbildung 44: Contourplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ϵ_y^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 1200$ s bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

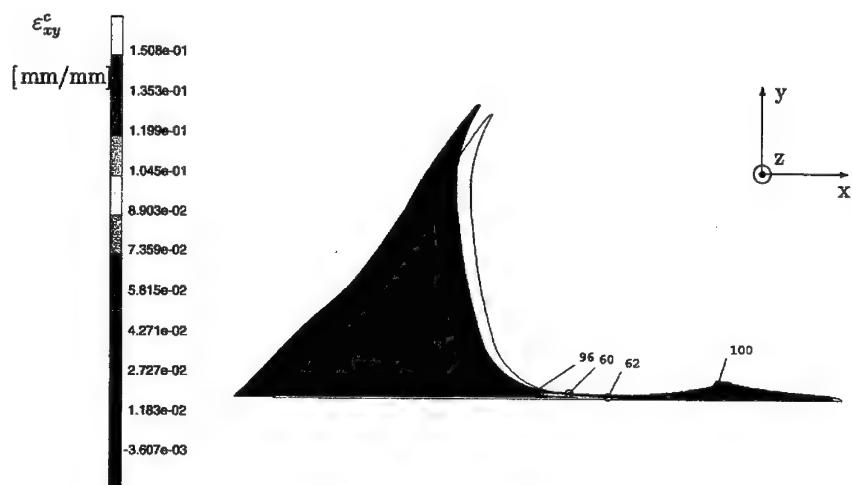


Abbildung 45: Contourplot der Kriechgleitungen ϵ_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = 900$ s bei einer Temperatur von $+79^\circ\text{C}$

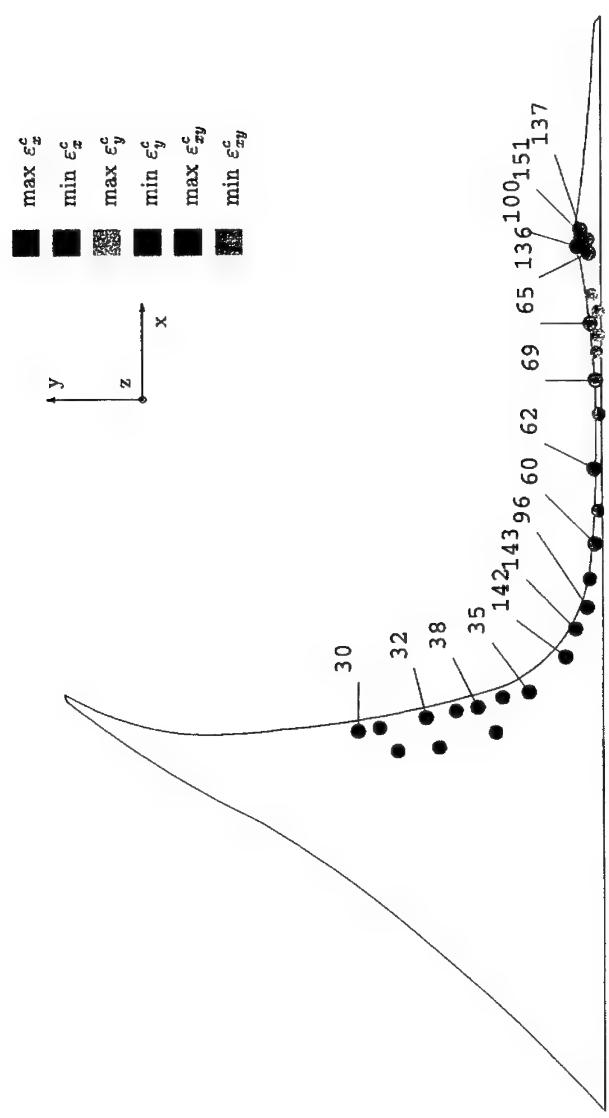


Abbildung 46: Lotbereiche mit extremen Kriechdehnungen über alle Zeiten t mit $t \in \{100s, 200s, 900s, 1200s\}$

5.5.6 Bewertung und Schlußfolgerungen

Betrachtet man die Simulationsergebnisse des Temperaturanstiegs, insbesondere die in den Abschnitten 5.5.1, 5.5.3, 5.5.4 und 5.5.5 beschriebenen thermischen, elastischen und plastischen Dehnungen sowie die Kriechdehnungen, so geht daraus hervor, welche der geometrischen Teilbereiche der Lötverbindung im Bereich Lot besonders fein und welche größer vernetzt werden können, um bei gleicher Präzision Simulationsergebnisse mit kürzeren Rechenzeiten zu erzielen.

Die im folgenden aufgeführten Ergebnisse der Simulation des Temperaturanstiegs sind in besonderem Maße relevant für die Planung der nachfolgenden Simulation von Temperaturzyklen:

1. Die elastischen und die plastischen Dehnungsanteile im Teilbereich Lot der Lötverbindung bei Temperaturanstieg an der Gesamtdehnung sind relativ klein. Die genaue Berechnung dieser Dehnungsanteile ist jedoch unbedingt notwendig, da die Simulation des Kriechens im Lotmaterial sensitiv gegenüber kleinen Dehnungsänderungen, insbesondere der plastischen Dehnungen, ist. Um also die elastischen und die plastischen Dehnungsanteile mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen, müssen die Teilbereiche des Modells der Lötverbindung, in denen diese Dehnungsanteile ihr Maximum annehmen, bzw. die Teilbereiche, in denen deren Gradienten besonders groß sind, sehr fein modelliert werden.
2. Wie aus Abschnitt 5.5.3 hervorgeht, treten beachtenswerte elastische Dehnungen im Bereich des Lotes vor und unter dem SMC, also im Lotspalt an der Materialgrenze zur Nickel-Passivierungsschicht auf.

Größere plastische Dehnungen konzentrieren sich auf den Bereich des Lotes vorne links unter dem SMC wie in Abschnitt 5.5.4 beschrieben.

Eine Überlappung der Teilbereiche maximaler elastischer und plastischer Dehnungen tritt also im Bereich des Lotes vorne links unter dem SMC an der Materialgrenze zur Nickel-Passivierungsschicht auf. Bei nachfolgenden Simulationen ist also darauf zu achten, daß die finiten Elemente in diesen Teilbereichen eine sehr kleine Kantenlänge aufweisen. Dabei sollte die Schmalseite der Elemente parallel zur y-Achse verlaufen, da in dieser Richtung der Dehnungsgradient jeweils am größten ist.

3. Die Kriechdehnungen haben den größten Anteil an der Gesamtdehnung.
Ein Teilbereich der maximalen Kriechdehnungen in Richtung der x-Achse (Abschnitt 5.5.1) weist hohe Kriechdehnungswerte auf. Da die Kriechdehnungsgradienten in diesem Bereich jedoch nicht sehr groß sind, ist es nicht notwendig, die Elemente in diesen Bereichen besonders klein zu wählen.
4. Die Werte großer Kriechgleitungen (Abschnitt 5.5.3) in der Darstellungsebene beschränken sich auf den Bereich des Lotspaltes in der Umgebung der Knoten 60, 62 und 96 und den der Lotkehle in der Umgebung des Knotens 100. In diesen Bereichen sind daher für die folgenden Simulationen die viereckigen Elemente derart zu modellieren, daß sie möglichst Winkel haben, die nur unwesentlich von 90° verschiedenen sind, da die hier auftretenden Gleitungen eine Veränderung der Elementwinkel bei größter Deformation um bis zu 15° im Vergleich zu den Elementwinkeln im unbelasteten Zustand bewirken.

5. Alle bisher nicht erwähnten Regionen des Lotbereiches können mit Elementen größerer Kantenlänge modelliert werden, weil die Werte der Dehnungen bzw. ihrer Gradienten hier im Vergleich zu den oben aufgezählten Orten klein sind. Zu den Regionen, in denen also bei den weiteren Simulationsrechnungen Elemente größerer Kantenlänge gewählt werden können, zählen besonders die Umgebung rechts von der Lotkehle²² und der größte Teil des dreieckförmigen Lotdepots, also des Fillets²³. Zu beachten ist dabei jedoch, daß sich die Elementkantenlänge nicht sprunghaft, sondern allmählich ändert.
6. Die im Bereich des SMC auftretenden Dehnungen — abgesehen von dem Teilbereich in der Umgebung der Materialgrenze zur Silberkappe — (siehe Abbildung 20) sind im Vergleich zu den anderen besonders klein. Für die folgenden Simulationen bedeutet das, daß dieser Teilbereich des SMC sehr viel größer vernetzt werden kann. Der Teilbereich des SMC in der Umgebung der Materialgrenze zur Silberkappe jedoch enthält die größten Dehnungsgradienten, ist also feiner als der übrige Bereich des SMC zu modellieren. Es sind also unter Beachtung der geometrischen Randbedingungen wesentlich weniger als die hier verwendeten 632 Elemente notwendig, ohne daß dadurch die Simulationsergebnisse an Präzision verlieren.
7. Da im Bereich der Kontaktkappe des SMC, also in den Bereichen Silber und Nickel-Passivierungsschicht und deren unmittelbarer Umgebung, die Vergleichsspannungen und die Vergleichsspannungsgradienten ihre jeweils größten Werte annehmen (siehe Abbildung 20), sind diese Bereiche der Lötverbindung am feinsten zu vernetzen.
8. Der Bereich PCB kann ebenfalls, mit Ausnahme der Umgebung der Materialgrenze zur Kupfer-Lötlandefläche, wesentlich größer, also mit weniger als den hier verwendeten 606 Elementen, modelliert werden, da hier die Vergleichsspannungen (siehe Abbildung 19) einen sehr kleinen Gradienten aufweisen. Besonders der Bereich links unten kann sehr grob vernetzt werden. Daß die Vergleichsdehnungen hier etwa mittlere Werte im Vergleich zu den anderen in der Lötverbindung auftretenden annehmen, ist für die Größe der verwendeten Elemente nicht von Bedeutung.
9. Der Bereich in der Umgebung der Kupfer-Lötlandefläche hingegen ist sehr fein zu vernetzen, da die Leiterplatte aufgrund ihres kleinen E-Moduls sehr weich ist und sich in dieser Umgebung am meisten verformt. Da die Dehnungsgradienten hier jedoch nicht ganz so groß sind wie in der Umgebung der Materialgrenze zwischen Lot und Nickel-Passivierungsschicht, brauchen die finiten Elemente im Bereich PCB in der Umgebung zur Kupfer-Lötlandefläche nicht die kleinsten des Modells zu sein.
10. Hieraus ergibt sich, daß finite Elemente kleinster Kantenlänge im Bereich der Nickel-Passivierungsschicht und ihrer Umgebung vorzusehen sind.
11. Die Dehnungsanteile entwickeln sich, abgesehen von den Kriechdehnungsanteilen, stärker in Abhängigkeit von der Temperatur als von der Zeit. Für die im folgenden zu simulierenden Temperaturzyklen bedeutet das, daß die Phase des Temperaturanstiegs wesentlich schneller durchlaufen werden kann als bei vorangegangenen Simulationen, bei denen die Temperaturanstiegszeit 900 s betrug.
12. Bereits die grob vernetzte Lötverbindung bringt Simulationsergebnisse hervor, die eine plausible Verteilung der Spannungs- und Dehnungsanteile zeigen. Die Werte unterscheiden sich jedoch noch deutlich von den Simulationsergebnissen zur mittleren

²²vgl. *Lotkehle* im Anhang

²³vgl. *Fillet* im Anhang

Vernetzung. Erst die Simulationsergebnisse der mittleren und der feinen Vernetzung stimmen nahezu überein. Eine weitere Verfeinerung liefert bei ungleich höherem Rechenaufwand nur eine marginale Verbesserung in den Simulationsergebnissen und ist deshalb nicht gerechtfertigt. Also werden die weiteren Untersuchungen vornehmlich hiermit durchgeführt.

13. Bei der Wahl der Elementtypen wurde festgestellt, daß die überwiegende Verwendung linearer Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes sowie linearer Dreieckselemente ebenen Dehnungszustandes an Stellen mechanisch geringer Belastung im Bereich des Lotes die Rechenzeit minimiert und gleichzeitig die besten Simulationsergebnisse liefert.
14. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse ist bei der im folgenden durchzuführenden Simulation von Temperaturzyklen ein Zeitabschnitt pro Zyklus vorzusehen, in dem die Temperatur auf dem Betriebsniveau gehalten wird, damit sich die insbesondere von der Zeit abhängigen Kriechdehnungen entwickeln können.

6 Thermisches Belastungsprofil II: Temperaturzyklus

Auf dem Wege zur Beantwortung der eingangs gestellten Frage "Wie lange hält die Lötverbindung?" unter thermischer Ermüdungsbelastung wird nun die zyklische thermische Belastung einer Lötverbindung untersucht.

6.1 Beschreibung der zyklischen Temperaturwechsel

Das thermische Belastungsprofil II beschreibt einen typischen Thermozyklus während der Belastungsdauer einer Baugruppe.

Bei der Bemessung der Dauer eines Zyklus werden mehrere Dinge berücksichtigt:

1. Die Temperaturanstiegs- und abfallzeiten entsprechen in ihrer Dauer den Erwärmungs- bzw. den Abkühlungsphasen realer elektronischer Bauteile.
2. Die Zeittabschnitte konstanter Temperatur geben den in diesen Zeiträumen hauptsächlich auftretenden Kriechdehnungen Gelegenheit, sich ihrer Bedeutung entsprechend zu entwickeln.
3. Sie sind einerseits so lang wie nötig, um der hohen Bedeutung des Kriechens bei realen Lötverbindungen gerecht zu werden,
4. und andererseits so kurz wie möglich, um vergleichende Experimente in vertretbarer Zeit durchführen zu können. Realistischerweise kann nach Engelmaier [12] bei Lötverbindungen von einer Lebensdauer von ca. 3000 Thermozyklen ausgegangen werden.
5. Will man bei Zugrundelegung von 3000 Thermozyklen ein vergleichendes, zeitraffendes Experiment²⁴ in einem Zeitraum von 3 Wochen durchgeführt haben, so darf bei ununterbrochenen durchgeföhrten Zyklen ein einzelner Zyklus nicht länger als 10 Minuten dauern.
6. Also wird die Länge eines Thermozyklus auf 600 Sekunden festgelegt.
7. Da die Kriechgeschwindigkeit bei niedriger Temperatur am geringsten ist, wird für diesen Zeitabschnitt des Zyklus die längste Zeitdauer gewählt.
8. Aus dem gleichen Grunde wird die Zeitdauer des Abkühlens länger als die des Temperaturanstiegs bemessen.
9. Da bei hoher Temperatur die Kriechgeschwindigkeit relativ groß ist, kann die Zeitspanne hoher, konstanter Temperatur am kürzesten sein.
10. Die oben beschriebenen Anforderungen an das Profil eines Thermozyklus sorgen dafür, daß in einem entsprechenden Experiment die im Feldeinsatz auftretenden Versagensmechanismen wie die der Langzeit-Ermüdung erfaßt werden. Bei Wahl kürzerer Abschnitte für den Thermozyklus wie auch bei Thermoschocks besteht die Gefahr, daß die Bedeutung dieser Versagensmechanismen verfälscht wird oder gar

²⁴vgl. *zeitraffende Experimente* im Anhang

neue eingeführt werden. Das kann dann zu Fehlinterpretationen der Simulationsergebnisse führen.

11. Der zu beschreibende Temperaturbereich wird wie in Abschnitt 2.1 auf den Bereich von -20 °C bis +80 °C festgelegt.

Ein thermischer Zyklus (vgl. Abb. 47) besteht also aus vier Phasen, die später in Gleichung Gl. (10) mathematisch beschrieben werden:

1. Der thermische Zyklus beginnt zur Zeit $t = t_0$ ($= 0$ s) mit einer Erwärmungsphase. Die Temperatur wird dabei monoton von einer Ausgangstemperatur von -20 °C auf die Betriebstemperatur von +80 °C gebracht. Diese Phase hat eine Dauer von t_{an} ($= 120$ s) Sekunden und endet zum Zeitpunkt $t_1 = t_0 + t_{an}$ ($= 120$ s).
2. Während der zweiten Phase, beginnend mit dem Zeitpunkt t_1 Sekunden, wird die Betriebstemperatur von +80 °C konstant über eine Zeitspanne von t_{ho} ($= 60$ s) Sekunden gehalten.
3. Der thermische Zyklus setzt sich mit einer Abkühlphase fort. Dabei wird die Temperatur von der Betriebstemperatur +80 °C monoton auf die Ausgangstemperatur -20 °C abgesenkt. Diese Phase beginnt zum Zeitpunkt $t_2 = t_1 + t_{ho}$ ($= 180$ s) Sekunden und dauert t_{ab} ($= 180$ s) Sekunden.
4. Der thermische Zyklus schließt mit einer vierten Phase, in der die Temperatur konstant bei der Ausgangstemperatur von -20 °C gehalten wird. Dieser Abschnitt beginnt zur Zeit $t_3 = t_2 + t_{ab}$ ($= 360$ s) Sekunden und dauert t_{hu} ($= 240$ s) Sekunden.

Dabei wird auch bei diesem Belastungsprofil vereinfachend von einer homogenen Temperaturverteilung im Modell ausgegangen.

Insgesamt werden fünf derartige Temperaturzyklen der Periodenlänge t_4 mit

$$t_4 = t_{ges} = t_{an} + t_{ho} + t_{ab} + t_{hu} = 600 \text{ s} \quad (9)$$

simuliert.

$$T(t) = \begin{cases} -20 + 100 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{an}}\right)\right) & , \text{ für } t_0 \leq t < t_1 \\ +80 & , \text{ für } t_1 \leq t < t_2 \\ +80 - 100 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ab}}\right)\right) & , \text{ für } t_2 \leq t < t_3 \\ -20 & , \text{ für } t_3 \leq t < t_4 \end{cases} \quad (10)$$

In der den Temperaturzyklus beschreibenden Gleichung Gl. (10) steht

T für die Temperatur in °C und

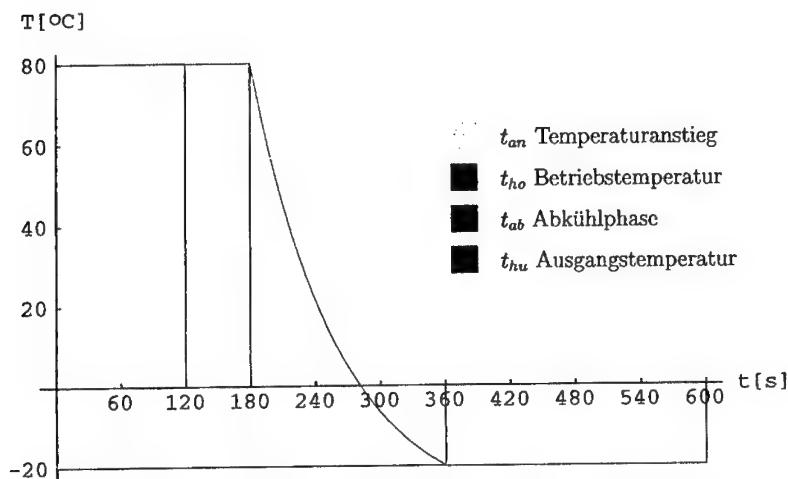


Abbildung 47: Thermisches Belastungsprofil II der Lötverbindung: Einer der zyklischen Temperaturwechsel

t für die Zeit in Sekunden.

τ_{an} °C und τ_{ab} °C sind Konstanten.

Für die Simulation ist es ausreichend, fünf Thermozyklen zu simulieren, da sich bei der Simulation dann keine weiteren Änderungen ergeben.

6.2 Geometrie der Lötverbindung und Verschiebungsrandbedingungen

Die Geometrie des Finite-Element-Modells der Lötverbindung wird wie zuvor schon beim Belastungsprofil I aus den auf Abbildung 7 dargestellten Verhältnissen abgeleitet.

Bei der industriellen Fertigung von Leiterplatten variieren die Standhöhen zwischen SM-Bauteil und Leiterplatte. Da die Standhöhe der einzelnen Bauteile einen wesentlichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer von Lötverbindungen und damit auf die von Baugruppen hat, ist dies ein wesentlicher Simulationsparameter.

Um eine realistische Spannbreite von Standhöhen zu modellieren, werden drei ausgewählt. Die Gesamtdarstellung der Finite-Element-Vernetzung ist auf Abbildung 48 stellvertretend mit einer Standhöhe von $30\ \mu\text{m}$ zu sehen. Die Lotteilbereiche sind für jede der drei Standhöhen abgebildet:

- $30\ \mu\text{m}$ — vgl. Abbildung 49,

- $58 \mu\text{m}$ — vgl. Abbildung 50 und
- $100 \mu\text{m}$ — vgl. Abbildung 51.

Wie beim thermischen Belastungsprofil I werden symmetrische Randbedingungen an der rechten Seite in x-Richtung angenommen (vgl. Abb. 15).

6.3 Verwendete Elementtypen

Wie schon beim thermischen Belastungsprofil I werden die Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Elementtypen durchgeführt. Die Simulation zyklischer Belastung erfolgt zum einen mit den dort bereits aufgeführten Elementtyp-Konfigurationen. Zusätzlich werden Simulationen mit den folgenden Konfigurationen durchgeführt:

1. Im Lotbereich werden Elemente ebenen Dehnungszustandes mit reduzierter Integration²⁵ eingesetzt. Alle anderen Bereiche wurden mit linearen Dreiecks- und Vierseckselementen ebenen Dehnungszustandes simuliert.
2. Zuletzt werden lineare Dreieckselemente ebenen Dehnungszustandes in der Konfiguration eines *Cross-Hatch* im Bereich der größten Scherungen verwendet.

6.4 Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung

Es werden wiederum jeweils 3 verschieden feine Netze verwendet und unter den Kriterien der Realitätsnähe der Simulationsergebnisse und der benötigten Rechenzeit bewertet.

Auf der Abbildung 48 ist exemplarisch die Einteilung der drei Modellgeometrien in finite Elemente bei Verwendung eines Netzes mittlerer Verfeinerung dargestellt, wie sie für die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Simulationen (5.3.5 und 6.3.1) verwendet wird.

Auf den Abbildungen 49–51 sieht man jeweils in einer Detailvergrößerung die Einteilung des Lotbereichs des Modells in finite Elemente. Es wird stets darauf geachtet, daß das Verhältnis der längsten zur kürzesten Seite eines Elementes nicht größer als 8 : 1 wird. Des Weiteren wird sichergestellt, daß bei den Viereckselementen nur wenige Winkel kleiner als 45° sind.

²⁵vgl. *finite Elemente mit reduzierter Integration* im Anhang

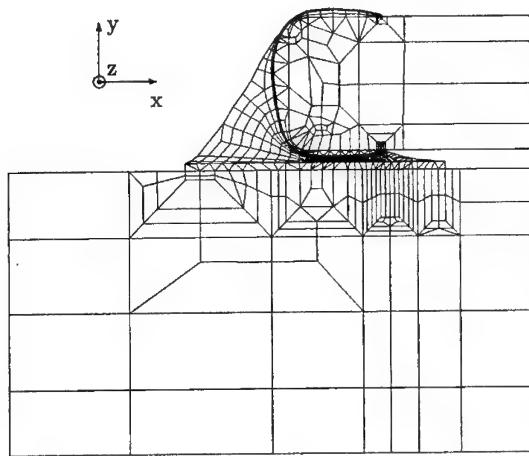


Abbildung 48: Gesamtdarstellung der Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$ bei mittlerer Vernetzung

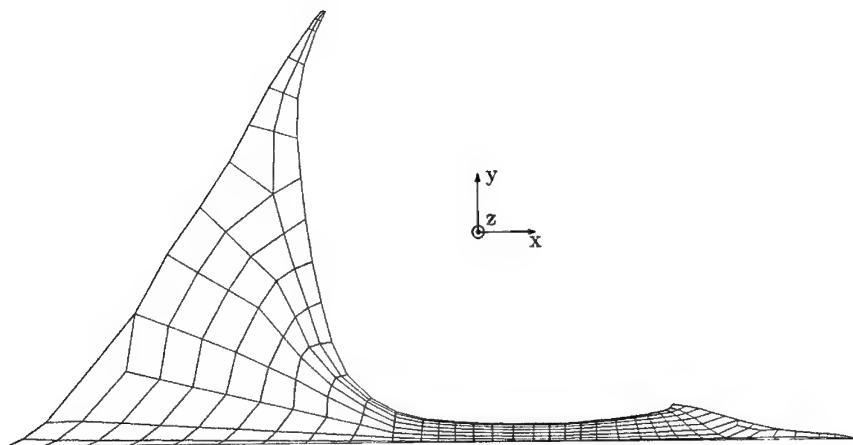


Abbildung 49: Darstellung des Teilbereiches 'Lot' der Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$ bei mittlerer Vernetzung

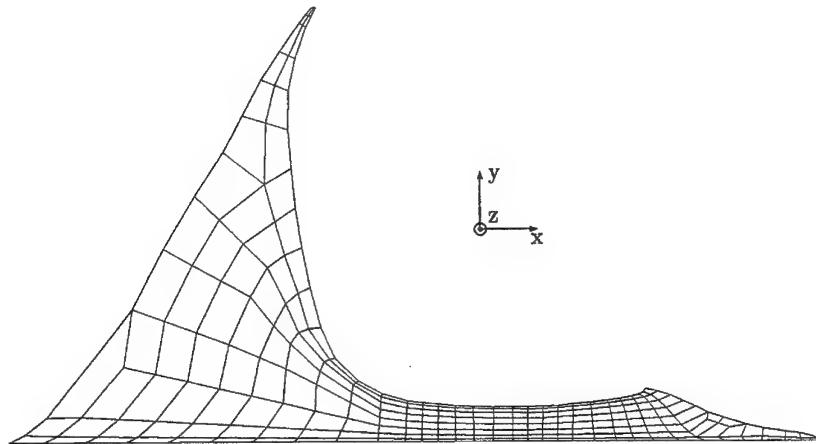


Abbildung 50: Darstellung des Teilbereiches 'Lot' der Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$ im Bereich des Lots bei mittlerer Vernetzung

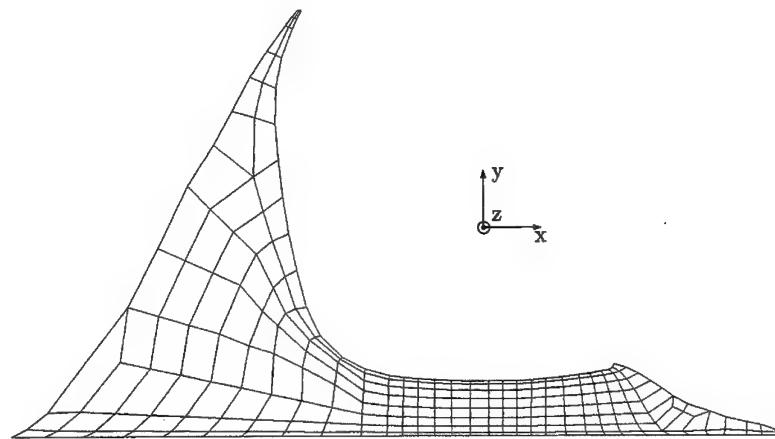


Abbildung 51: Finite-Element-Vernetzung der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$ im Bereich des Lots bei mittlerer Vernetzung überwiegend mit linearen Vierecks-Elementen — an wenigen Stellen werden Dreieckselemente verwendet

6.5 Simulationsergebnisse

Aus den gleichen Gründen, wie bereits in Abschnitt 5.5 geschildert, genügt es, im folgenden die Simulationsergebnisse bei mittlerer Vernetzung zu betrachten. Auf die Präsentation der Simulationsergebnisse verschiedener Elementkonfigurationen kann verzichtet werden, da diese sich nicht wesentlich unterscheiden.

Deshalb werden im folgenden die Simulationsergebnisse für den zyklischen Temperaturwechsel — das thermische Belastungsprofil II — am Beispiel der Simulation, in der ausschließlich lineare Viereckelemente ebenen Dehnungszustandes verwendet werden, beschrieben.

Die Entwicklung der mechanischen Belastung in der Lötverbindung wird im folgenden

- anhand von Contour-Plots
 - der elastischen Dehnungen,
 - der plastischen Dehnungen und
 - der Kriechdehnungen

im Bereich des Lotes beschrieben, um einen Überblick über die hier auftretenden Dehnungsanteile zu erhalten.

Für diejenigen Komponenten, die sich in Abhängigkeit von der Standhöhe deutlich unterscheiden, werden Contour-Plots der verschiedenen Standhöhen, also die Simulationsergebnisse der Modelle mit den Standhöhen

- 30 μm ,
- 58 μm und
- 100 μm

miteinander verglichen.

Andernfalls werden nur die Contour-Plots für die Standhöhe 100 μm angegeben.

Das typische Verhalten in einem Zyklus stellt sich erst nach einer gewissen Einschwingphase ein. Um in den folgenden Betrachtungen jedoch das Verhalten eines typischen Zyklus zu untersuchen, wird jeweils der fünfte Thermozyklus miteinander verglichen.

Die zeitliche Entwicklung der verschiedenen Dehnungsanteile wird beurteilt, indem Contour-Plots zu den Zeitpunkten

- t_1 in $T_5 = 2520\text{ s}$, also am Ende der Erwärmungsphase,
- t_2 in $T_5 = 2580\text{ s}$, also am Ende der Phase 2, in der die Betriebstemperatur gehalten wird,
- t_3 in $T_5 = 2760\text{ s}$, also am Ende der Abkühlphase und
- t_4 in $T_5 = 3000\text{ s}$ also am Ende der Phase 4, in der die Ausgangstemperatur gehalten wird,

im fünften zyklischen Temperaturwechsel miteinander verglichen werden.

- Zweitens erfolgt eine Detailanalyse der verschiedenen Dehnungsanteile anhand von Transienten-Plots. Hier werden die verschiedenen Dehnungsanteile an ausgewählten Knotenpunkten in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Es wird untersucht, wie sich die verschiedenen Dehnungsanteile bei Belastung der Lötverbindung mit einem Temperaturzyklus entwickeln.

Es werden immer zwei Transientenplots pro Knoten dargestellt. Im oberen wird die Transiente über alle fünf Zyklen dargestellt, im unteren wird in einer Detailvergrößerung die Entwicklung im fünften Zyklus dargestellt.

In jedem Contourplot sind drei Kurven dargestellt. Die rote markiert den Transientenplot an diesem Knoten für die untersuchte Ergebniskomponente für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\ \mu\text{m}$. Die grüne und die blaue markieren die entsprechenden Transienten für die Standhöhen $58\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$.

Die ausgewählten Knoten sind bereits in den Contourplots markiert. Um verschiedene Knoten zu unterscheiden, werden diese mit den Nummern, die sie bei der Netzgenerierung erhalten haben, gekennzeichnet. So haben beispielsweise die in Abbildung 54 gekennzeichneten Knoten ihre Nummern 422, 435 und 513 erhalten.

Die Spannungs- bzw. Dehnungsverläufe an den ausgewählten Knoten sind repräsentativ. Für jede Spannungs- bzw. Dehnungskomponente werden repräsentative Knoten aus den Bereichen mit den größten bzw. kleinsten Werten ausgewählt. Bei mehreren Bereichen mit maximalen Werten werden Knoten aus mehreren Bereichen ausgewählt. Unterscheidet sich das Verhalten stark an verschiedenen Knoten innerhalb eines Bereiches, so werden aus diesem entsprechend viele Knoten ausgewählt, um eine möglichst große Spannbreite darzustellen.

6.5.1 Die thermischen Dehnungen

Die Verhältnisse der thermisch erzeugten Dehnungen in der Lötverbindung bleiben bei der Simulation von zyklischen Temperaturwechseln unverändert im Vergleich zur Simulation des Temperaturanstiegs. Sie sind stets proportional zur Temperaturänderung wie aus der Gleichung Gl. (11) hervorgeht und werden auf den Abbildungen 52 und 53 dargestellt. Auf den Abbildungen steht jeweils die Kurve einer Farbe repräsentativ für das thermische Dehnungsverhalten an allen Knoten des entsprechenden Materials. So stellen z.B. die gelben Kurven das thermische Dehnungsverhalten des Lotmaterials an beliebigen Knoten im Lotmaterial dar.

$$\varepsilon_\alpha := \varepsilon_x^\alpha = \varepsilon_y^\alpha = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (11)$$

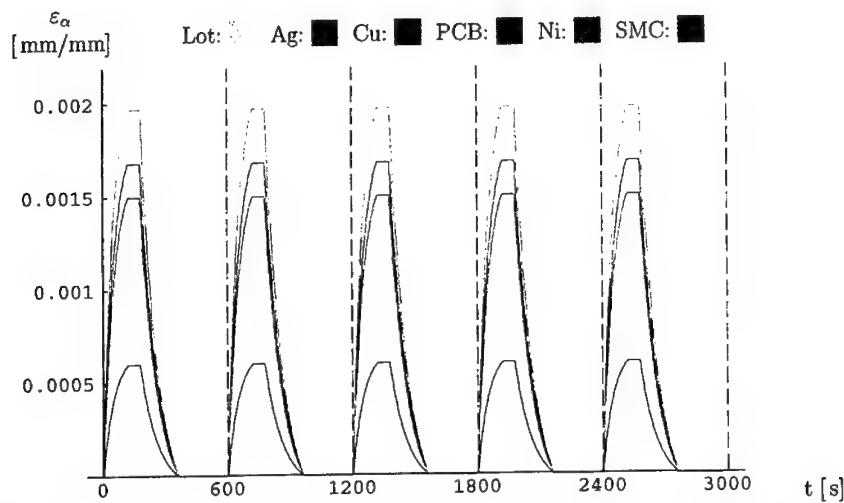


Abbildung 52: Transientenplot der thermischen Dehnungen ε_α in Koordinatenrichtung über die ersten fünf Temperaturzyklen

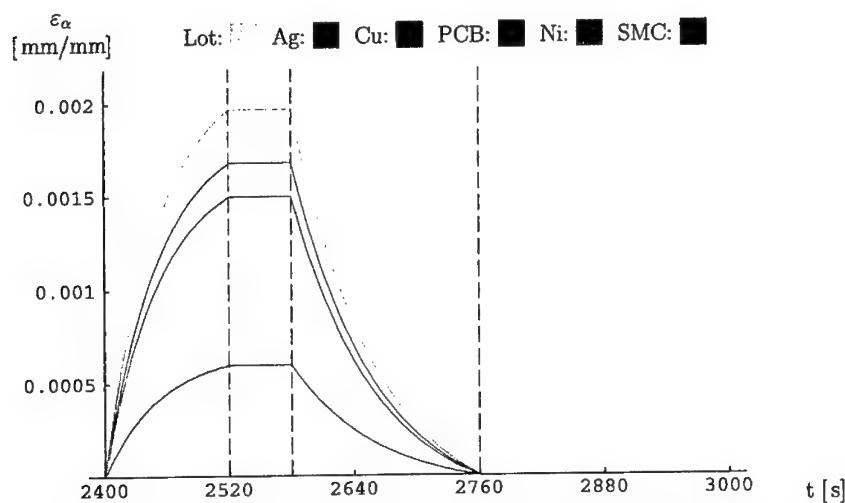


Abbildung 53: Transientenplot der thermischen Dehnungen ε_α in Koordinatenrichtung über den fünften Temperaturzyklus

6.5.2 Die elastischen Dehnungen

6.5.2.1 Die Contourplots der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 54 und 55 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 µm dargestellt.

In der Phase 2, in der die Betriebstemperatur konstant gehalten wird, also im Zeitintervall $[t_1, t_2]$, sind die horizontalen elastischen Dehnungen nahezu abgebaut.

Durch Ausschalten einer Komponente kühlst sich diese auf Umgebungs- bzw. Ausgangstemperatur ab. Bei der hier betrachteten Simulation bauen sich dadurch Spannungen auf, durch die das Lotmaterial in der Umgebung des Knotens 435 bis zu 0,13% gestaucht und in der Umgebung der Knoten 422 und 513 bis zu 0,05% gestreckt wird.

6.5.2.2 Die Transientenplots der horizontalen elastischen Dehnungen sind auf den Abbildungen 56 – 59 dargestellt. Bei allen Transientenplots ist eine *Einschwingphase* zu erkennen, deren Einfluß jeweils im fünften Temperaturzyklus vernachlässigbar klein wird. Unabhängig davon, welchen Knoten man betrachtet, ändern sich die Transientenplots nur unwesentlich mit der Standhöhe.

Deutlich erkennbar ist die starke Zunahme der horizontalen elastischen Dehnung bei abnehmender Temperatur. Nach Erreichen der tiefsten Temperatur nehmen die elastischen Dehnungen sehr langsam wieder ab. Bei Betriebstemperatur sinken die elastischen Dehnungen auf Werte um Null ab.

Betrachtet man beispielsweise Abbildung 56 näher, so lässt sich Folgendes ablesen: Im ersten Temperaturzyklus nimmt die elastische Dehnung zunächst zu, um noch vor Erreichen der Betriebstemperatur, nämlich bei Erreichen der Fließgrenze wieder abzunehmen und sich auf Werte um Null einzupendeln. Hierbei spielen das Plastifizieren und insbesondere das Kriechen eine entscheidende Rolle (vgl. die entsprechenden Abschnitte).

Im weiteren Verlauf der einzelnen Temperaturzyklen nimmt die elastische Dehnung große negative Werte schon jeweils in der Phase 3 eines jeden Temperaturzyklus an, um nur wenig in der Phase 4 wieder abzunehmen. Das liegt darin begründet, daß das Lot bei niedrigeren Temperaturen nicht so schnell kriecht wie bei höheren. Andernfalls würde die elastische Dehnung auch in der Phase 4 jeweils Werte um Null annehmen. So lässt sich hier jedoch nur Tieftemperatkriechen²⁶ feststellen.

Die Transientenplots an den Knoten 422 und 513 unterscheiden sich nur marginal. Daher wird nur der für den Knoten 513 angegeben.

6.5.2.3 Die Contourplots der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung sind auf den Abbildungen 62 und 63 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 µm dargestellt. Die von den in diesen Contourplots abweichenden Dehnungsverteilungen für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 30 µm sind auf der Abbildung 60 und für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 58 µm auf der Abbildung 61 dargestellt.

Die elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung haben ihre ausgeprägteste Verteilung bei

²⁶vgl. *Tieftemperatkriechen* im Anhang

-20 °C. Bei dieser Temperatur wird der Teilbereich des Lotes in der Umgebung des Knotens 563 den größten Streckungen — bis zu 0,043% — und der Teilbereich des Lotspaltes in der Umgebung der Knoten 515 und 422 den größten Stauchungen — bis zu 0,13% ausgesetzt.

6.5.2.4 Die Transientenplots der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung

sind auf den Abbildungen 64 – 67 dargestellt. Für Knoten 563 gelten die Abbildungen wie in Abb. 58 und 59.

Für die Temperaturabhängigkeit der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung gilt das gleiche wie bei den elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung. Darüberhinaus ist hier erstmals erkennbar, daß die Standhöhe der Lötverbindung einen Einfluß auf die zeitliche Entwicklung einer Dehnungskomponente hat. In den Transientenplots 64, 65 erkennt man deutlich, daß bei -20 °C und geringer Standhöhe die elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung rascher abnehmen als bei mittlerer und großer Standhöhe. Zugleich gehen die elastischen Dehnungen bei Betriebstemperatur nicht ganz soweit zurück wie bei den größeren Standhöhen.

6.5.2.5 Die Contourplots der elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene

Zwei signifikant verschiedene Schub-Verteilungen sind auf der Abbildung 69 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 µm und auf der Abbildung 68 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 30 µm zu sehen.

Wiederum ist die Ausprägung der Dehnungsverteilung für die niedrigste Temperatur des Temperaturzyklus am deutlichsten. Die elastischen Schubgleitungen sind bei Betriebstemperatur außer für die geringste Standhöhe praktisch Null. In der Umgebung der Knoten 551 und 57 gehen die elastischen Schubgleitungen bei Betriebstemperatur nicht auf Null zurück.

Bei -20 °C sind die elastischen Schubgleitungen am ausgeprägtesten. In der Umgebung der Knoten 473 und 632 sowie in der Umgebung des Knotens 115 werden die größten positiven elastischen Schubmaxima mit Werten bis zu 0,15% erreicht. Negative Schubextrema sind in der Umgebung der Knoten 57 und 551 mit Werten bis zu 0,27% zu beobachten.

6.5.2.6 Die Transientenplots der elastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene

sind auf den Abbildungen 70 – 75 dargestellt.

In der Umgebung der Knoten 473 und 632 sind die elastischen Schubgleitungen unabhängig von der Standhöhe — exemplarisch ist der Transientenplot am Knoten 473 auf der Abbildung 70 wiedergegeben. In der Umgebung der Knoten 57, 551 und 115 unter dem SMC und in der Lotkehle jedoch sind deutliche Abhängigkeiten von der Standhöhe zu beobachten. Dabei ist festzustellen, daß in der Umgebung der Knoten 57 und 551, bei denen die Transientenplots nahezu gleich verlaufen, bei Verringerung der Standhöhe von 100 µm auf 30 µm die elastischen Schubgleitungen auf fast das doppelte ansteigen. In der Lotkehle, in der Umgebung des Knotens 115, sind die Unterschiede nicht ganz so ausgeprägt, wenngleich sich die Verhältnisse umkehren. In diesem Bereich sind bei geringer Standhöhe die elastischen Schubgleitungen geringer als bei großer Standhöhe.

6.5.2.7 Überblick über die Bereiche extremer elastischer Dehnungen ist auf der Abbildung 76 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\text{ }\mu\text{m}$, auf der Abbildung 77 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58\text{ }\mu\text{m}$ und auf der Abbildung 78 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

Im wesentlichen gibt es fünf verschiedene Bereiche extremer elastischer Dehnungen:

1. Im Bereich in der Umgebung der Knoten 473 und 632 treten maximale Schubgleitungen auf.
2. Im Bereich in der Umgebung der Knoten 563 und 436 treten minimale horizontale und maximale vertikale Dehnungen auf.
3. Im Bereich in der Umgebung der Knoten 57 und 551 treten minimale Schubgleitungen in der Darstellungsebene auf.
4. Im Bereich in der Umgebung der Knoten 551, 422 und 513 treten maximale horizontale und minimale vertikale Dehnungen auf.
5. Im Bereich in der Umgebung des Knotens 115 treten minimale horizontale Dehnungen und maximale Schubgleitungen in der Darstellungsebene auf.

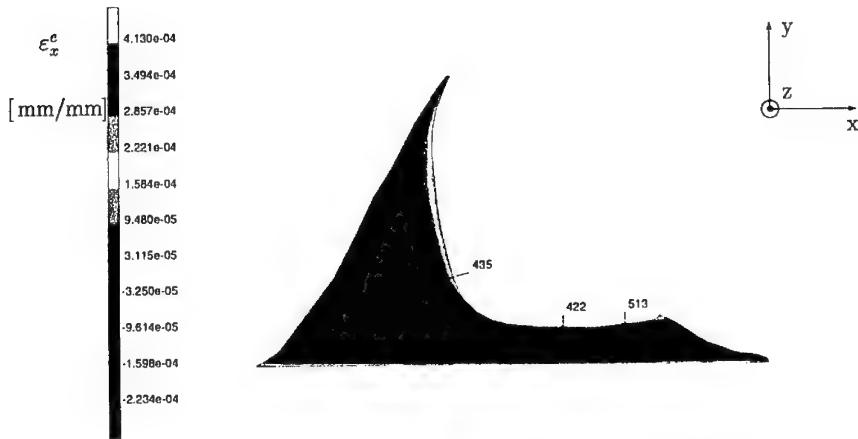


Abbildung 54: Contourplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 μm

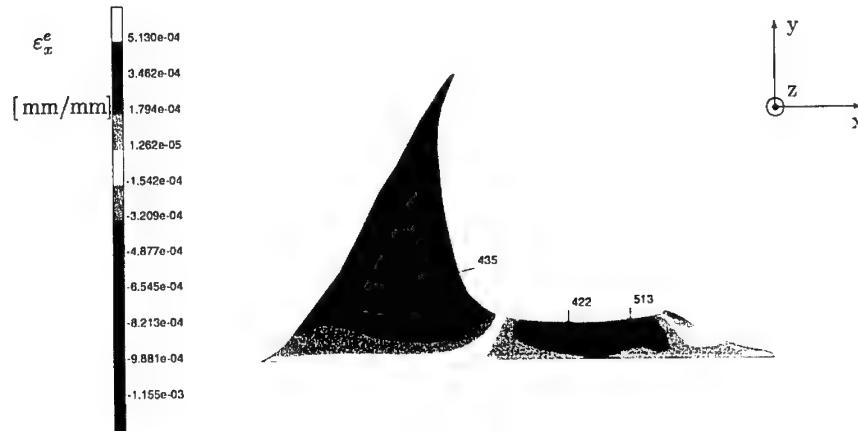


Abbildung 55: Contourplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_4$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 μm

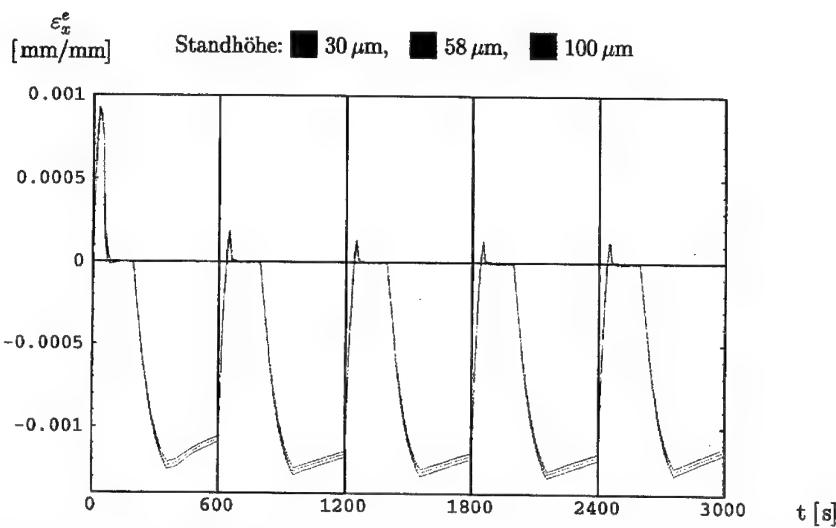


Abbildung 56: Transientenplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e am Knoten 435 über die ersten fünf Temperaturzyklen

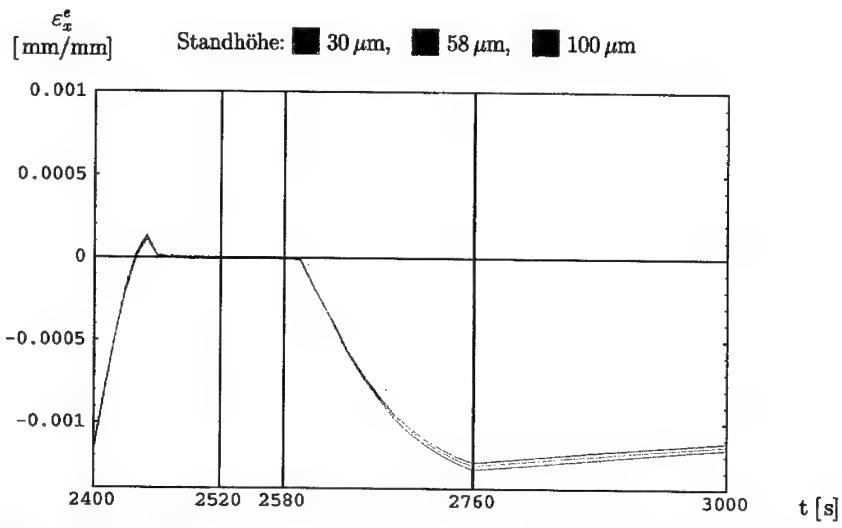


Abbildung 57: Transientenplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e am Knoten 435 über den fünften Temperaturzyklus

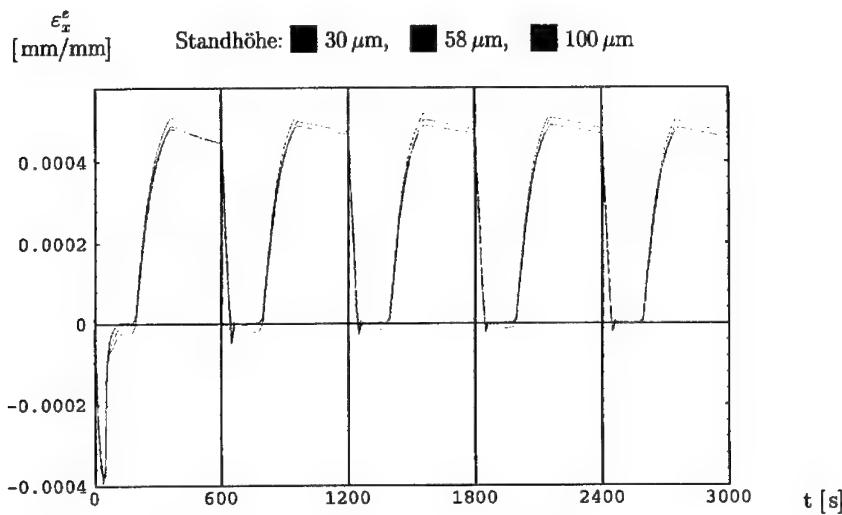


Abbildung 58: Transientenplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e am Knoten 513 über die ersten fünf Temperaturzyklen

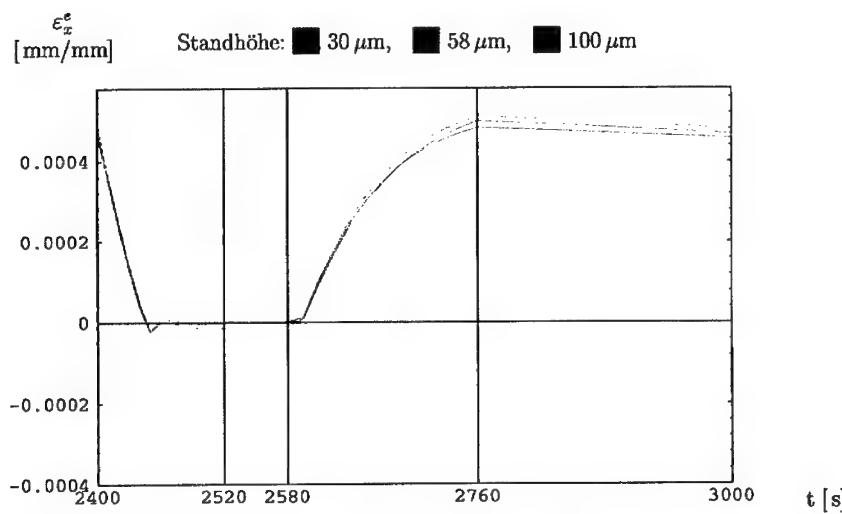


Abbildung 59: Transientenplot der elastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^e am Knoten 513 über den fünften Temperaturzyklus

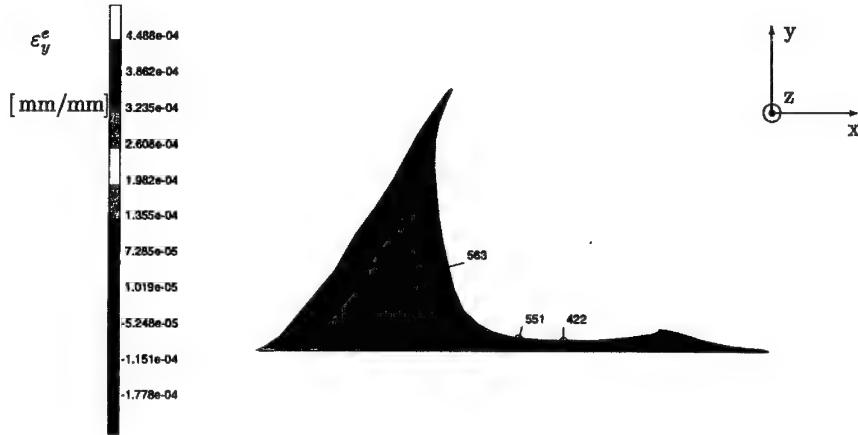


Abbildung 60: Contourplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

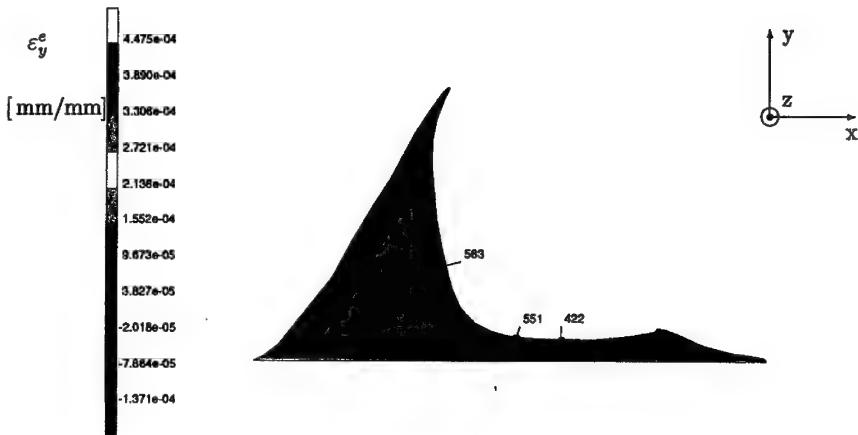


Abbildung 61: Contourplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

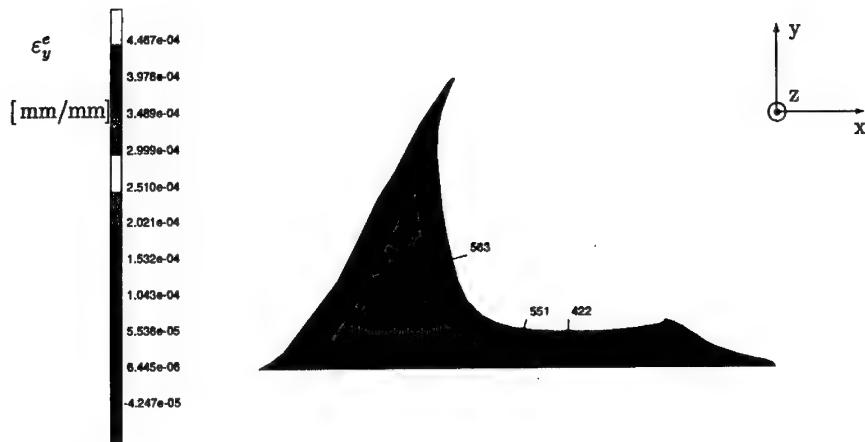


Abbildung 62: Contourplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 μm

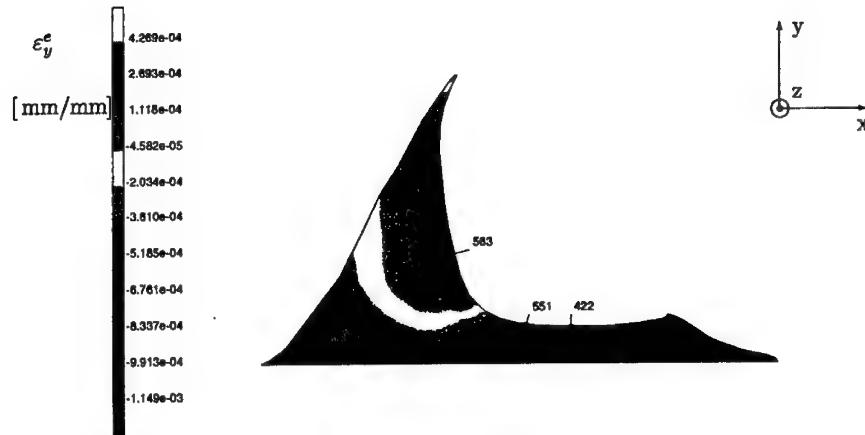


Abbildung 63: Contourplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_4$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von 100 μm

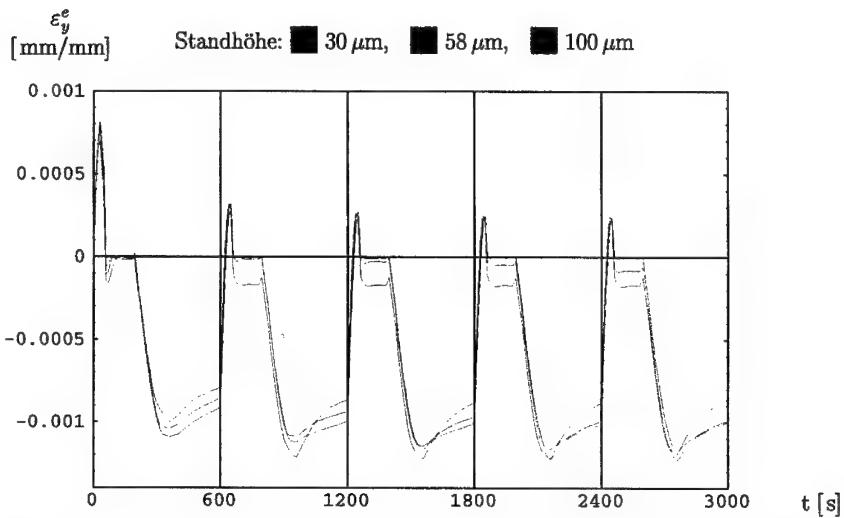


Abbildung 64: Transientenplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e am Knoten 551 über die ersten fünf Temperaturzyklen

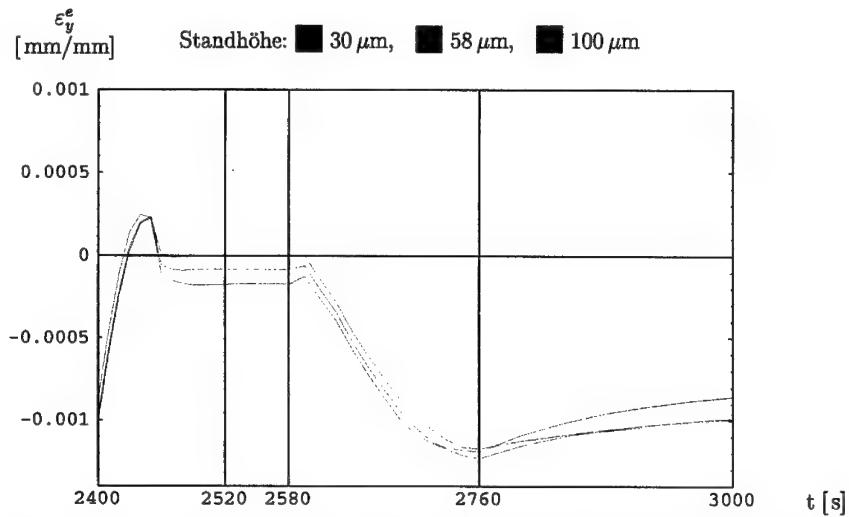


Abbildung 65: Transientenplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e am Knoten 551 über den fünften Temperaturzyklus

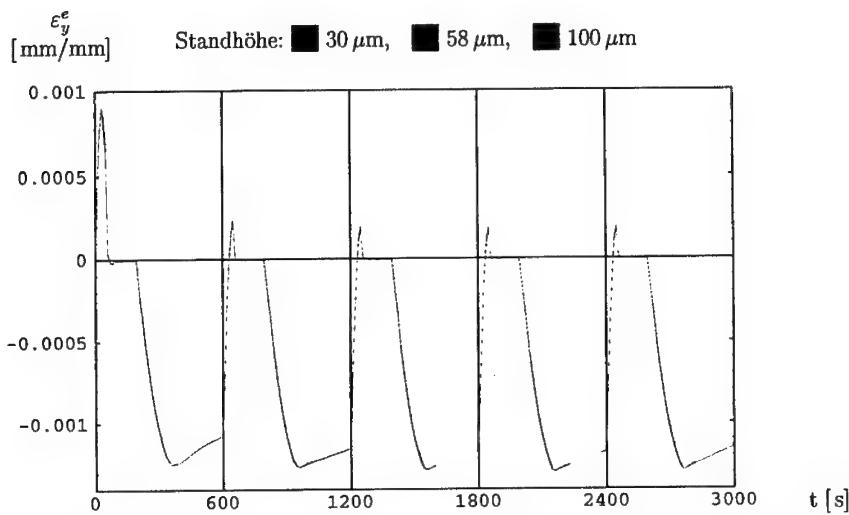


Abbildung 66: Transientenplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e am Knoten 422 über die ersten fünf Temperaturzyklen

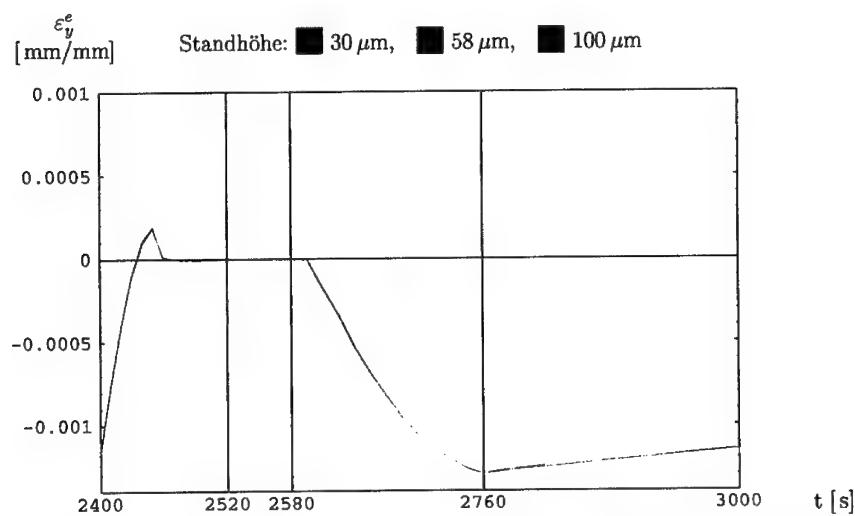


Abbildung 67: Transientenplot der elastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^e am Knoten 422 über den fünften Temperaturzyklus

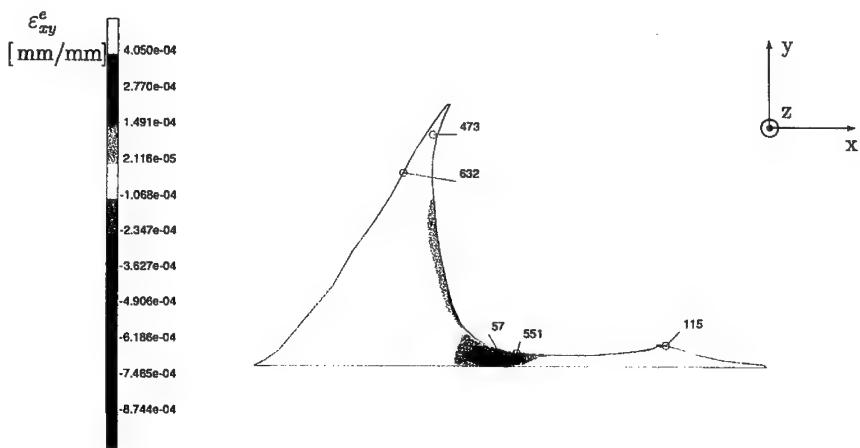


Abbildung 68: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_2$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

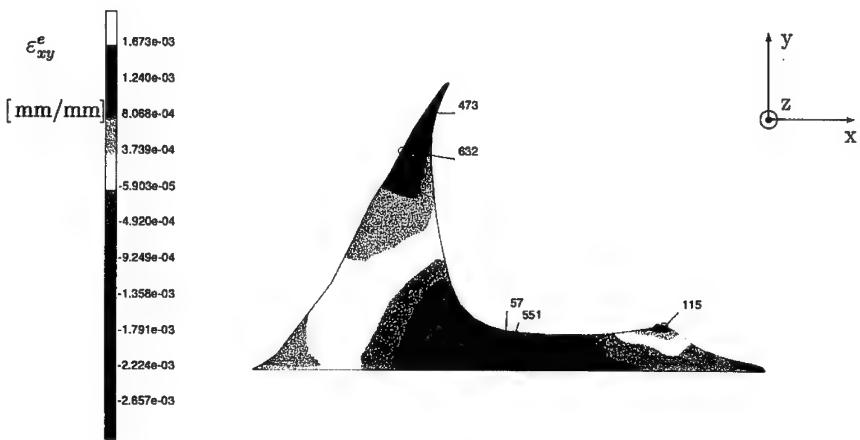


Abbildung 69: Contourplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_3$ der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

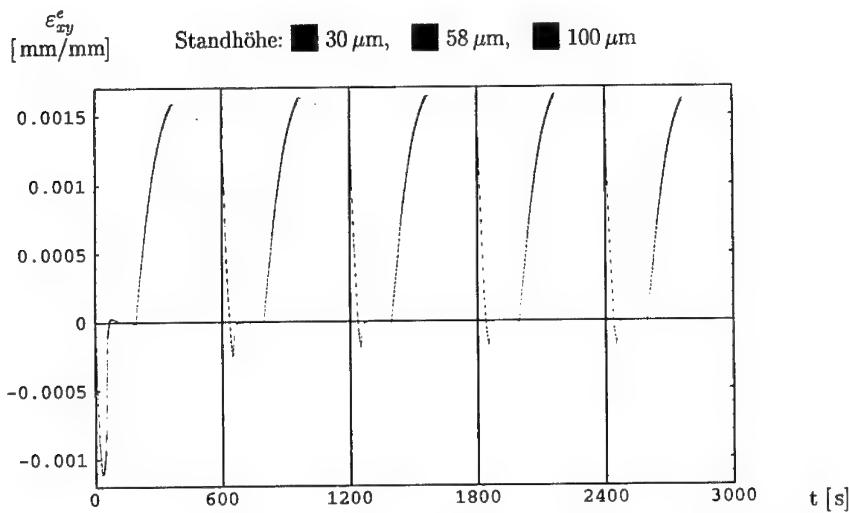


Abbildung 70: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-ebene am Knoten 473 über die ersten fünf Temperaturzyklen

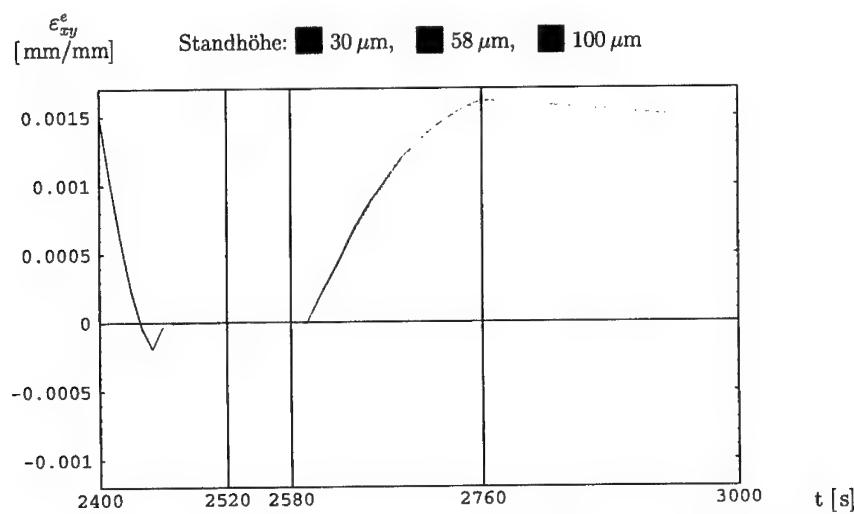


Abbildung 71: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-ebene am Knoten 473 über den fünften Temperaturzyklus

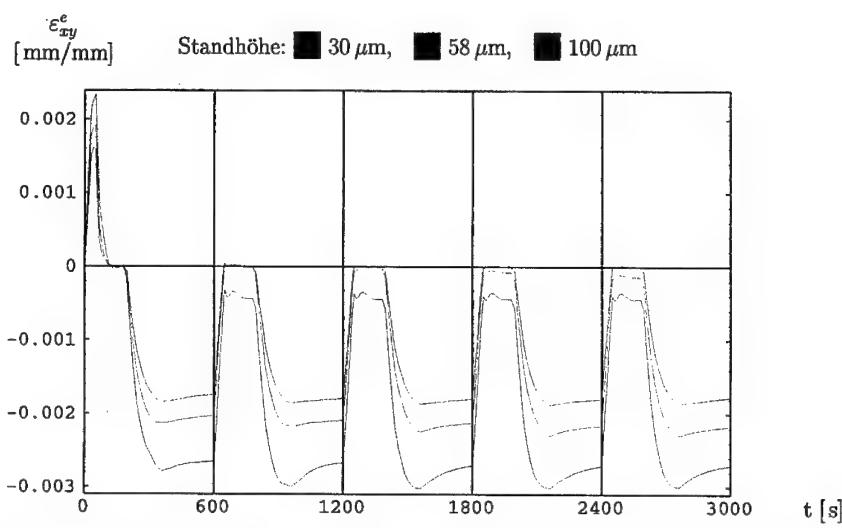


Abbildung 72: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-
ebene am Knoten 551 über die ersten fünf Temperaturzyklen

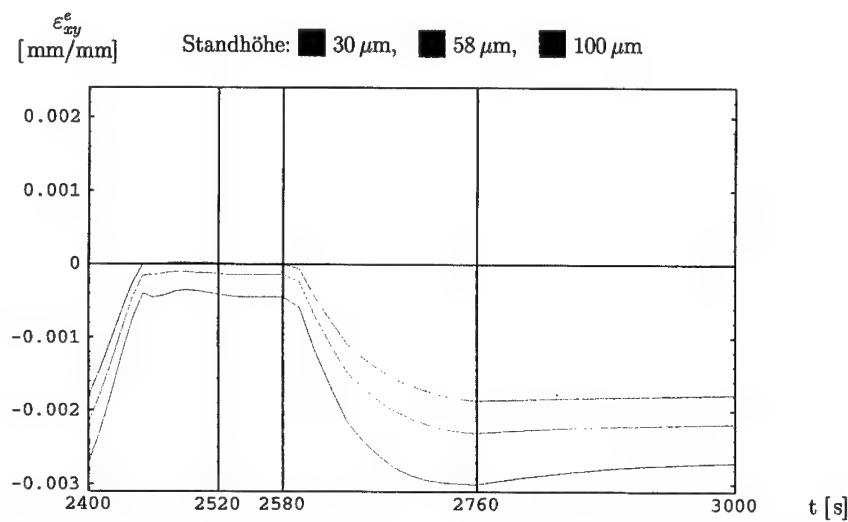


Abbildung 73: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-
ebene am Knoten 551 über den fünften Temperaturzyklus

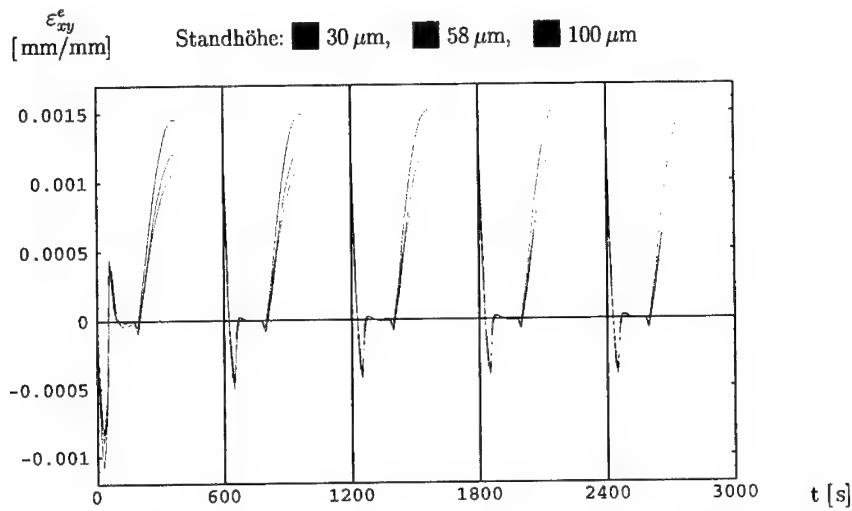


Abbildung 74: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-ebene am Knoten 115 über die ersten fünf Temperaturzyklen

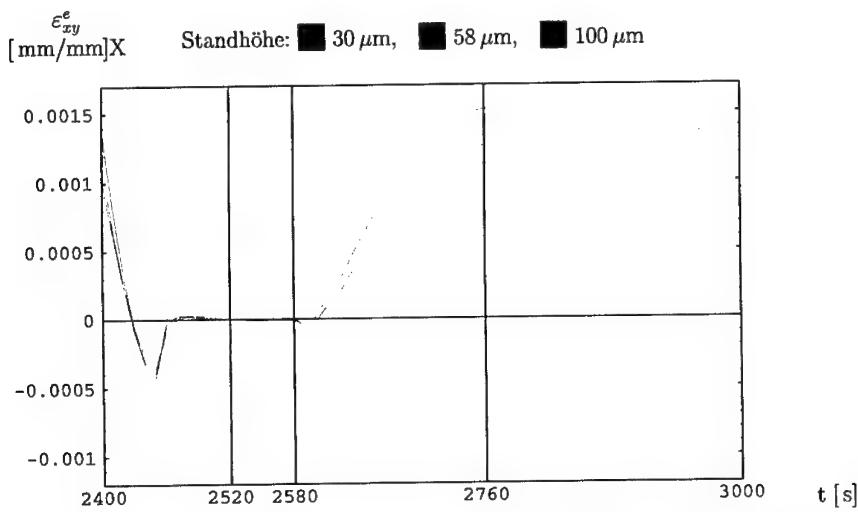


Abbildung 75: Transientenplot der elastischen Schubgleitungen ε_{xy}^e in der Darstellungs-ebene am Knoten 115 über den fünften Temperaturzyklus

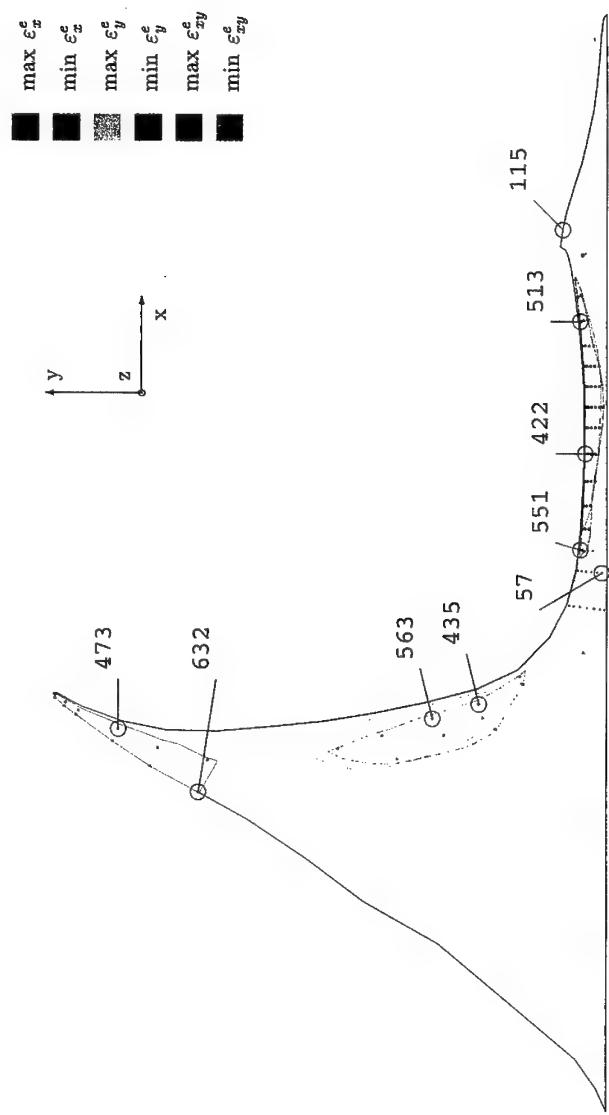


Abbildung 76: Lotbereiche mit extremen elastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

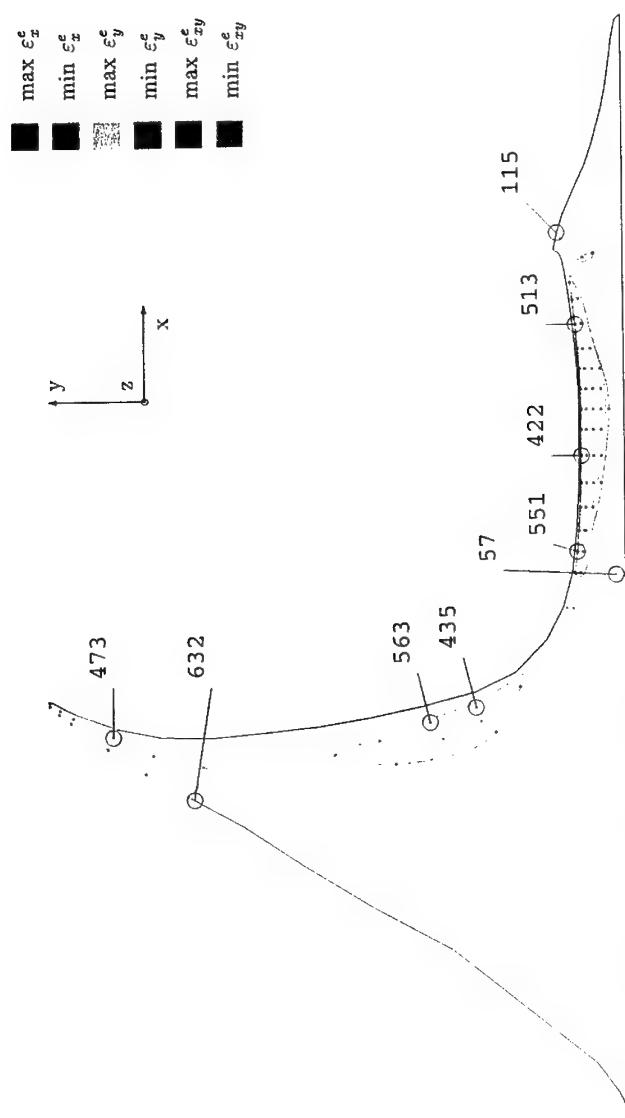


Abbildung 77: Lotbereiche mit extremen elastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

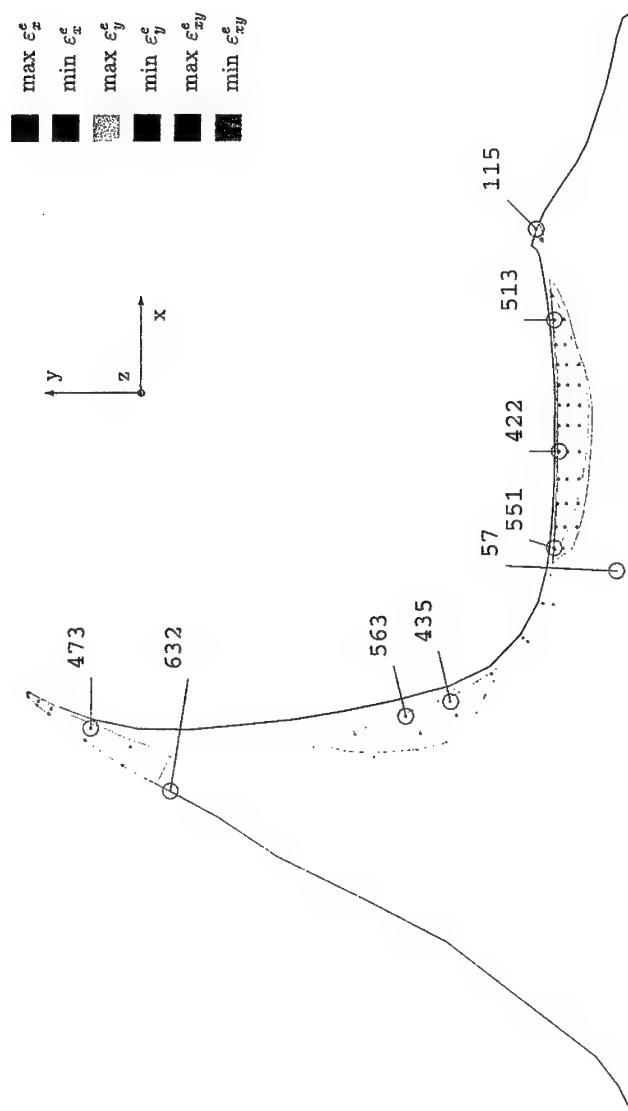


Abbildung 78: Lotbereiche mit extremen elastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

6.5.3 Die plastischen Dehnungen

6.5.3.1 Die Contourplots der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen auf den folgenden Seiten zu sehen. Abbildung 80 zeigt die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100\mu\text{m}$.

Auf der Abbildung 79 ist der Contourplot einer Lötverbindung der Standhöhe $30\mu\text{m}$ zum Vergleich zu sehen.

Das Lot plastifiziert in zwei eng benachbarten Teilbereichen — in der Umgebung des Knotens 356 einerseits und der Umgebung der Knoten 421 und 503 andererseits — und in einem dritten Teilbereich in der Lotkehle. In der Lotkehle wird das Lot geringfügig und in der Umgebung des Knotens 356 wird das Lot stark gestaucht. In der Umgebung der Knoten 421 und 503 wird das Lot stark gestreckt.

Bemerkenswert ist, daß die Größe des plastifizierenden Lot-Teilbereiches nur wenig mit der Standhöhe variiert. Da bei einer Standhöhe von nur $30\mu\text{m}$ die relativ großen Bereiche in der Umgebung von Knoten 356 sowie in der Umgebung der Knoten 421 und 503 keinen Platz mehr im Lotspalt finden, sind sie bei dieser geringen Standhöhe deformiert und erstrecken sich von der Nickel-Passivierungsschicht bis hin zur Kupfer-Lötlandefläche. Bei Standhöhen von bis zu etwa $45\mu\text{m}$ plastifiziert der Lotspalt an wenigstens einer Stelle in voller Höhe. Dabei ist der Teilbereich in der Umgebung der Knoten 421 und 503 entsprechend der Standhöhe "flachgedrückt".

6.5.3.2 Die Transientenplots der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 81 – 86 dargestellt.

Bei diesen und auf den weiteren Transientenplots der plastischen Dehnungen fällt auf, daß die Plastifizierungen ab dem 2. Temperaturzyklus jeweils zum Ende der Abkühlphase auftreten. Das ist eine unmittelbare Folge davon, daß zu diesem Zeitpunkt jeweils die Fließgrenze erreicht wird, wie man aus den Transientenplots der elastischen Dehnungen entnehmen kann.

6.5.3.3 Die Contourplots der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung sind auf den Abbildungen 87 und 88 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\mu\text{m}$ bzw. $100\mu\text{m}$ dargestellt.

Die Verteilung der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung in der Lötverbindung im Bereich des Lotmaterials ist bei Belastung durch einen Temperaturzyklus unabhängig von der Zeit. Die plastischen Dehnungen in dieser Koordinatenrichtung beschränken sich auf die Umgebungen der Knoten 503 und 551 des Lotbereiches im vorderen Bereich des Lotspaltes. Bei großer Standhöhe beschränken sich die Zonen vertikaler Plastifizierung auf einen Bereich an der Grenze zur Nickel-Passivierungsschicht in der Umgebung des Knotens 551. Nimmt die Standhöhe ab — bei dieser Dehnungskomponente bereits ab einer Standhöhe von weniger als $60\mu\text{m}$ — so erstreckt sich die Zone des Plastifizierens in dieser Richtung über die ganze Höhe des Lotpaltes.

Bei großer Standhöhe wird der ganze plastifizierte Bereich gestaucht. Bei kleinster Standhöhe bilden sich zwei kleinere Bereiche aus: Im größeren — in der Umgebung des Kno-

tens 503 — wird das Lot vertikal gestaucht und im kleineren — in der Umgebung des Knotens 551 — wird das Lot gestreckt.

6.5.3.4 Die Transientenplots der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung sind auf den Abbildungen 89 – 92 dargestellt.

6.5.3.5 Die Contourplots der plastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene sind auf den Abbildungen 93 und 94 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

Ähnlich wie die plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung beschränken sich die plastischen Schubgleitungen auf einen kleinen Lot-Bereich. Es handelt sich im wesentlichen um die Umgebung der Knoten 355, 356 und 551. Ein weitaus kleinerer Bereich plastischen Gleitens ist in der Umgebung des Knotens 115 festzustellen.

Bei großer Standhöhe bildet sich der plastifizierende Bereich nur in der Nähe der Materialgrenze zur Nickel-Passivierungsschicht aus. Wird die Standhöhe jedoch geringer als $60\text{ }\mu\text{m}$, so erstreckt sich der Bereich der plastischen Schubgleitungen von der Kupfer-Lötlandsfläche bis zur Nickel-Passivierungsschicht über die volle Höhe des Lotspaltes.

Wird die Standhöhe noch kleiner, so spaltet sich das negative Schubmaximum — hier wird das Lotmaterial im Uhrzeigersinn bleibend verformt — auf in zwei kleinere Bereiche mit Schubmaxima. Es entsteht in der Umgebung der Knoten 355 und 551 ein positives und in der Umgebung des Knotens 356 ein negatives Schubmaximum, wie auf Abbildung 93 zu sehen.

Die Verteilung — im Gegensatz zum Betrag — der plastischen Schubgleitungen ändert sich über die Zeit nicht.

6.5.3.6 Die Transientenplots der plastischen Schubgleitungen in der Darstellungsebene sind auf den Abbildungen 95 – 100 dargestellt. Da die Transientenplots an den Knoten 355 und 551 nahezu identisch verlaufen, ist nur der Plot am Knoten 355 (vgl. Abb. 98) wiedergegeben.

6.5.3.7 Der Überblick über Bereiche extremer plastischer Dehnungen ist auf der Abbildung 101 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\text{ }\mu\text{m}$, auf der Abbildung 102 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58\text{ }\mu\text{m}$ und auf der Abbildung 103 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

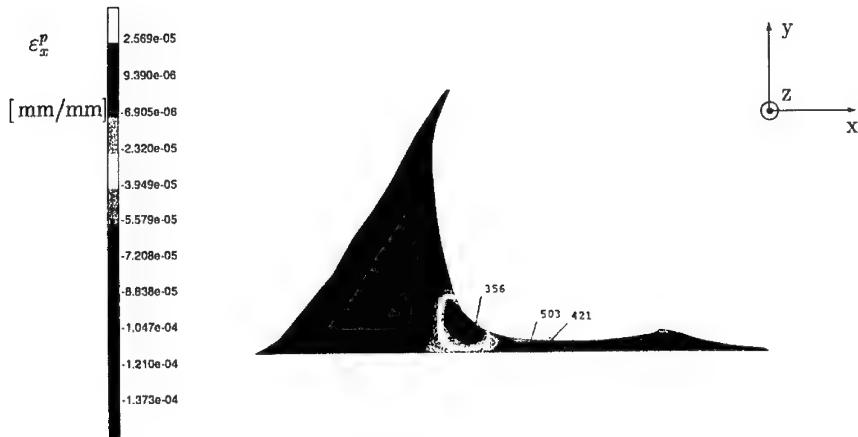


Abbildung 79: Contourplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

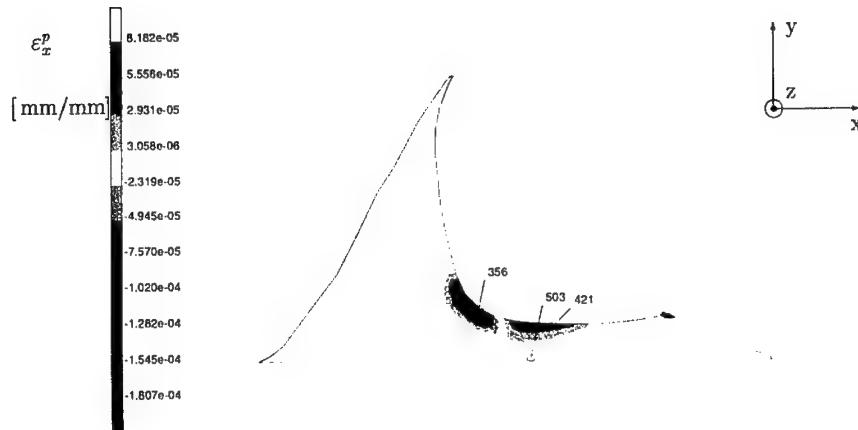


Abbildung 80: Contourplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_3$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

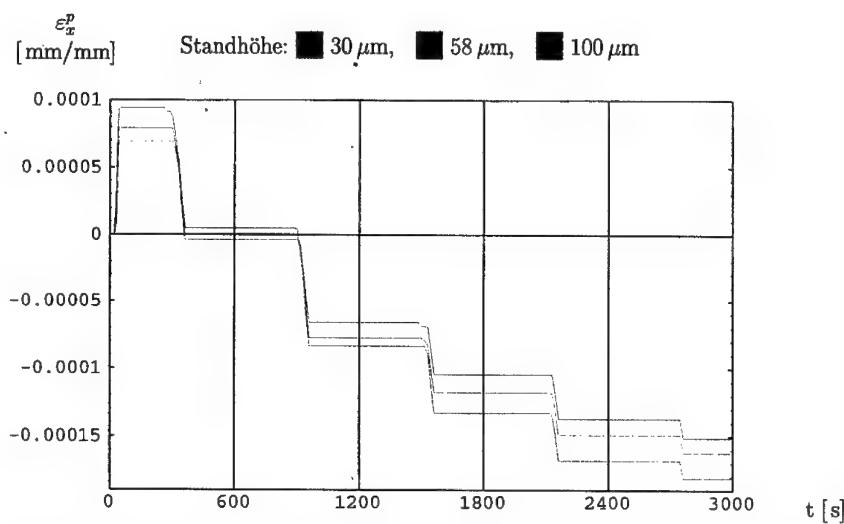


Abbildung 81: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 356 über die ersten fünf Temperaturzyklen

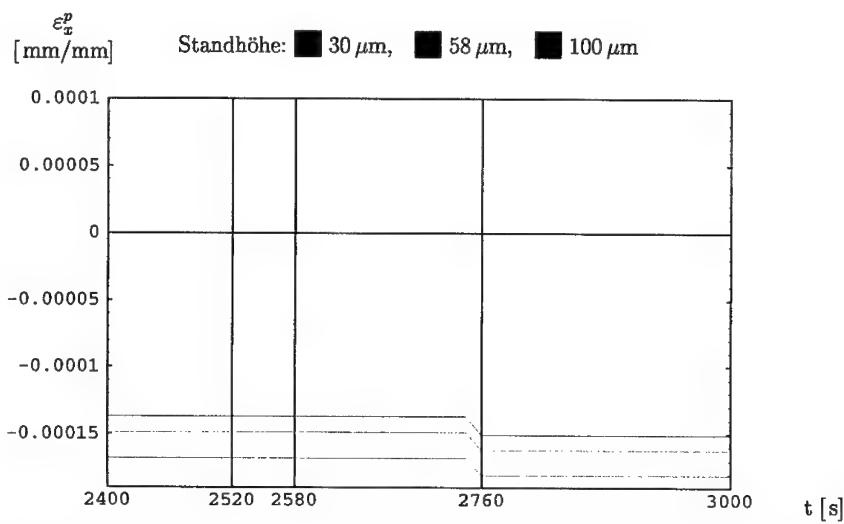


Abbildung 82: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 356 über den fünften Temperaturzyklus

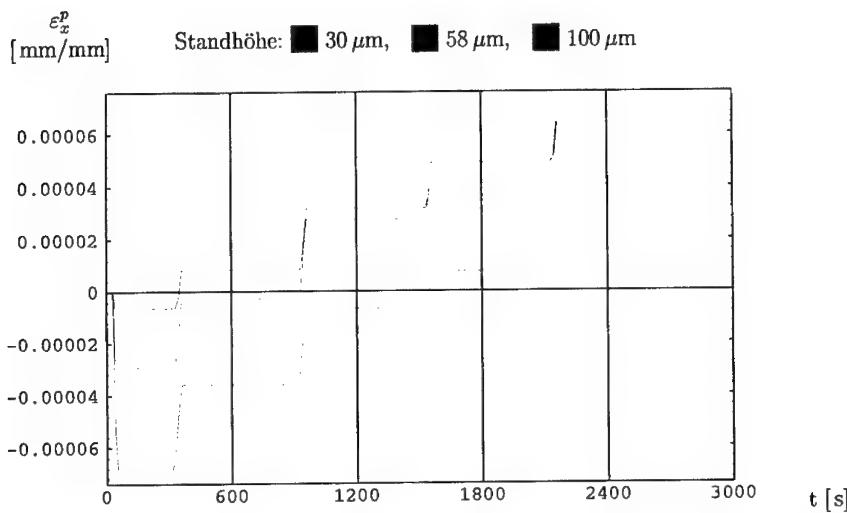


Abbildung 83: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 421 über die ersten fünf Temperaturzyklen

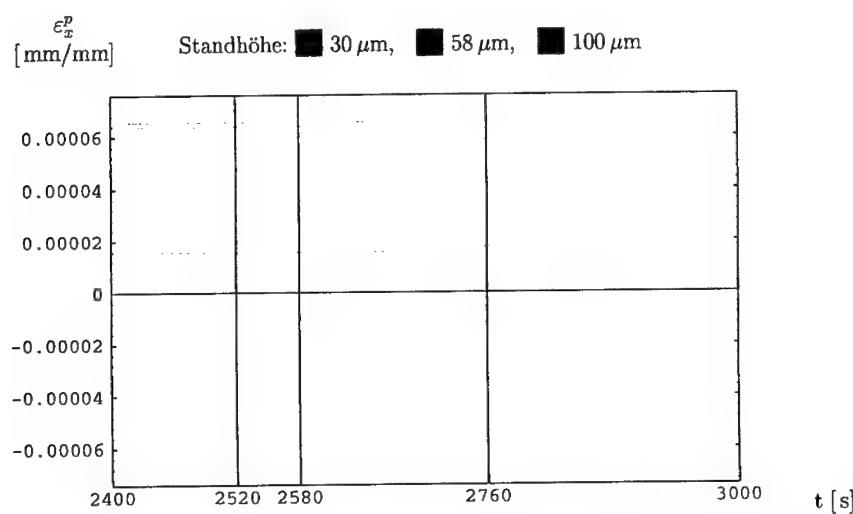


Abbildung 84: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 421 über den fünften Temperaturzyklus

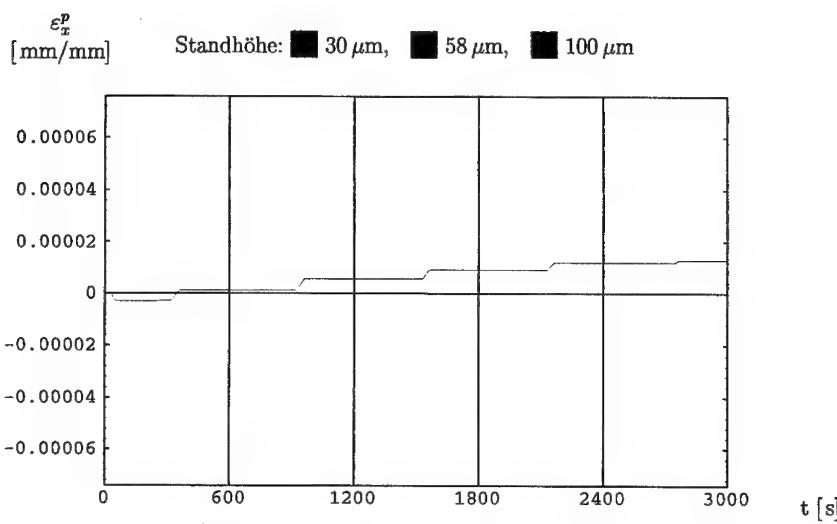


Abbildung 85: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 503 über die ersten fünf Temperaturzyklen

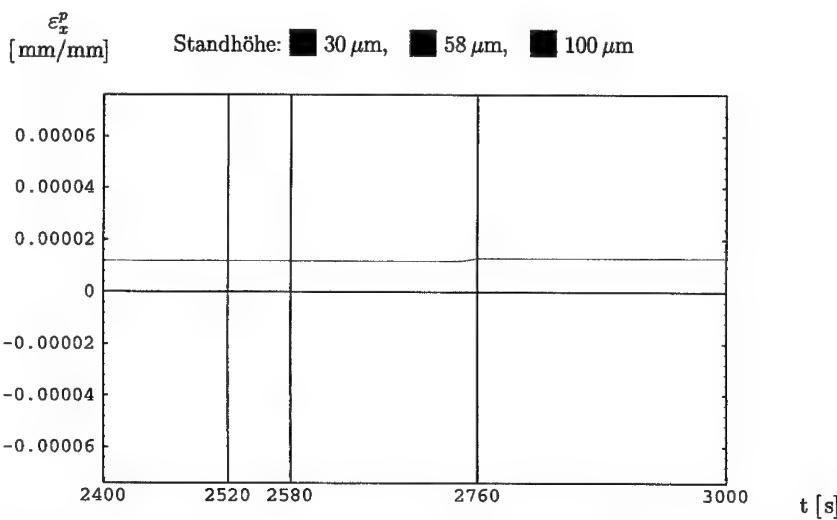


Abbildung 86: Transientenplot der plastischen Dehnungen in horizontaler Richtung ε_x^p am Knoten 503 über den fünften Temperaturzyklus

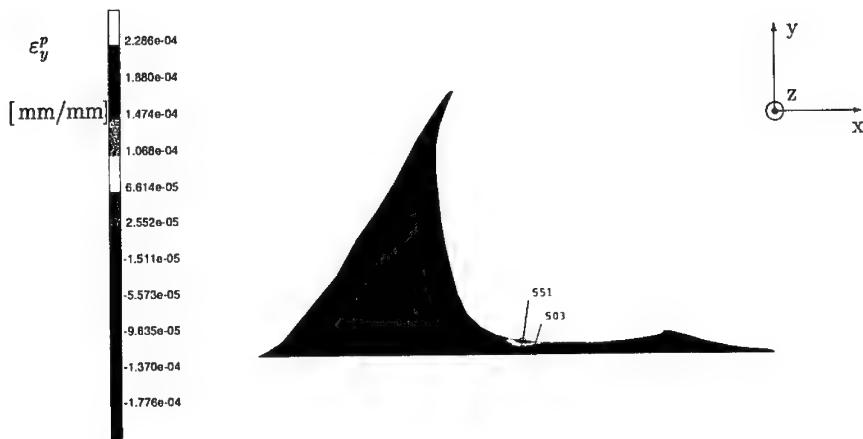


Abbildung 87: Contourplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

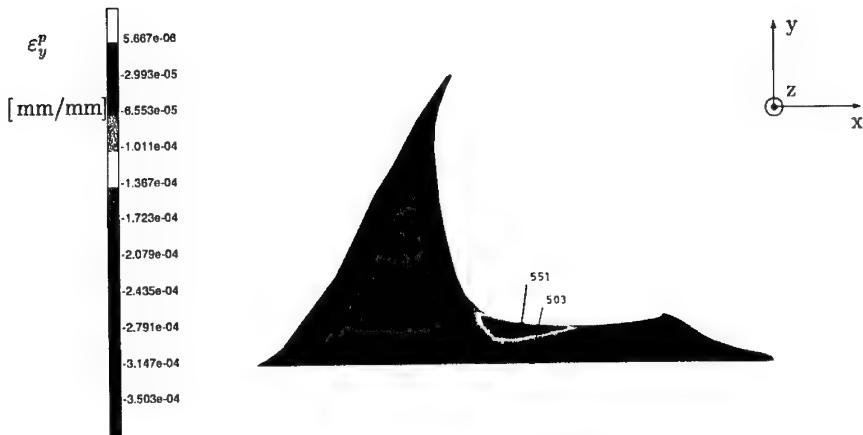


Abbildung 88: Contourplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

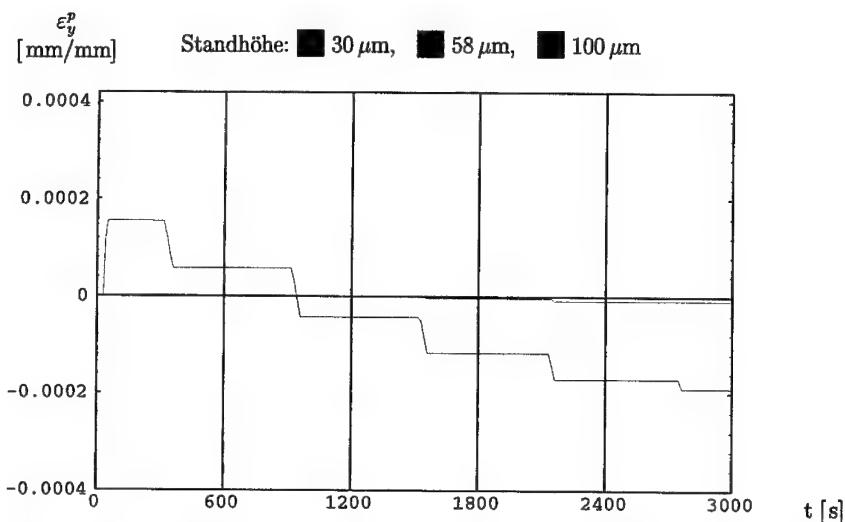


Abbildung 89: Transientenplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p am Knoten 503 über die ersten fünf Temperaturzyklen

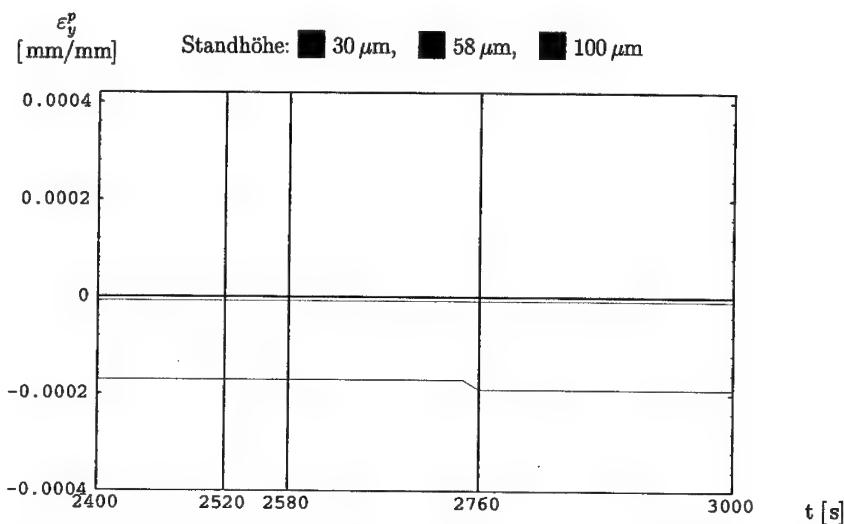


Abbildung 90: Transientenplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p am Knoten 503 über den fünften Temperaturzyklus

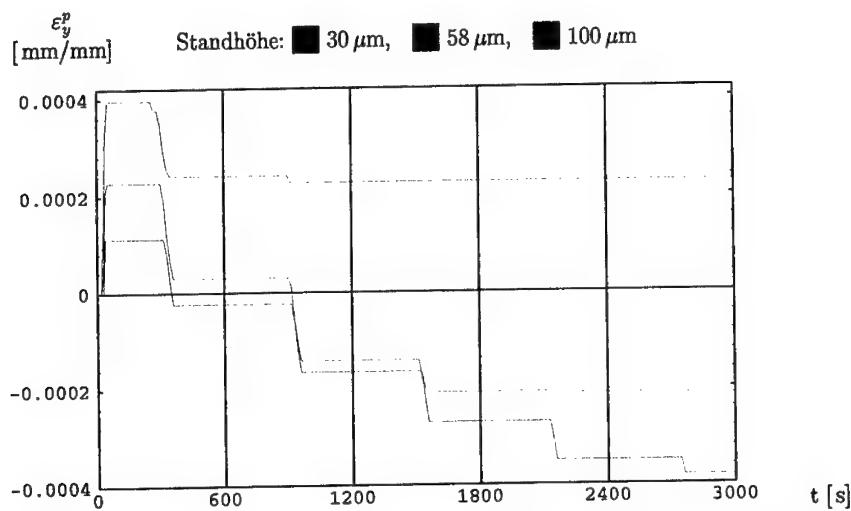


Abbildung 91: Transientenplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p am Knoten 551 über die ersten fünf Temperaturzyklen

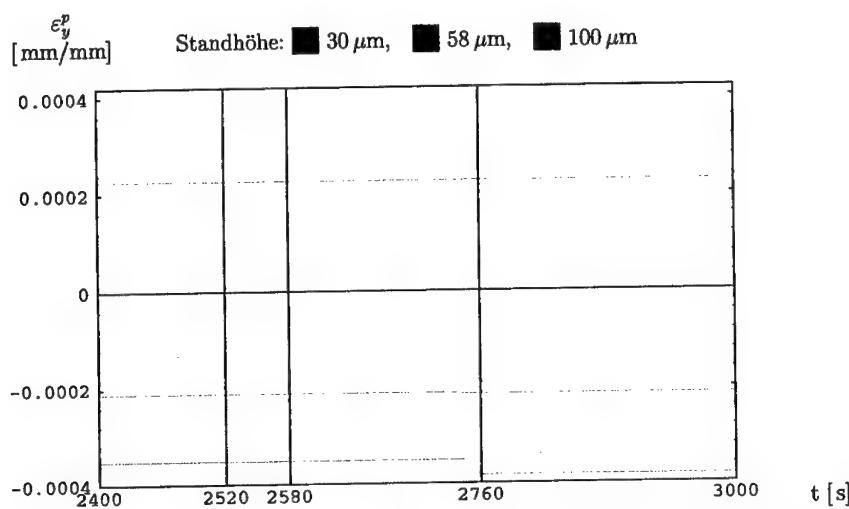


Abbildung 92: Transientenplot der plastischen Dehnungen in vertikaler Richtung ε_y^p am Knoten 551 über den fünften Temperaturzyklus

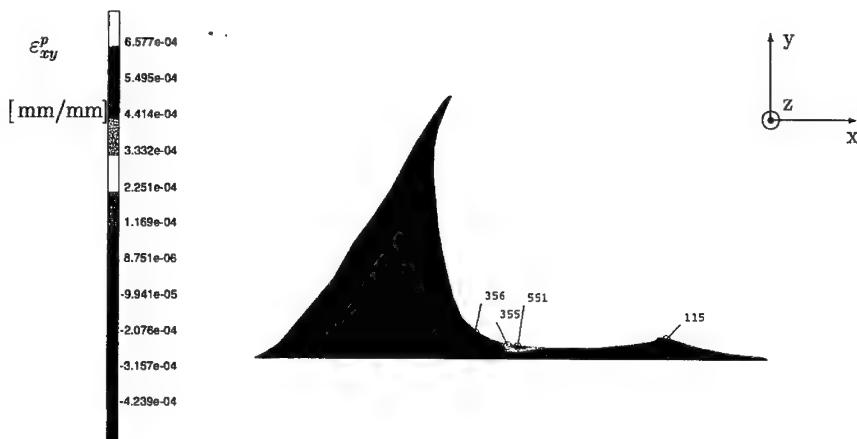


Abbildung 93: Contourplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

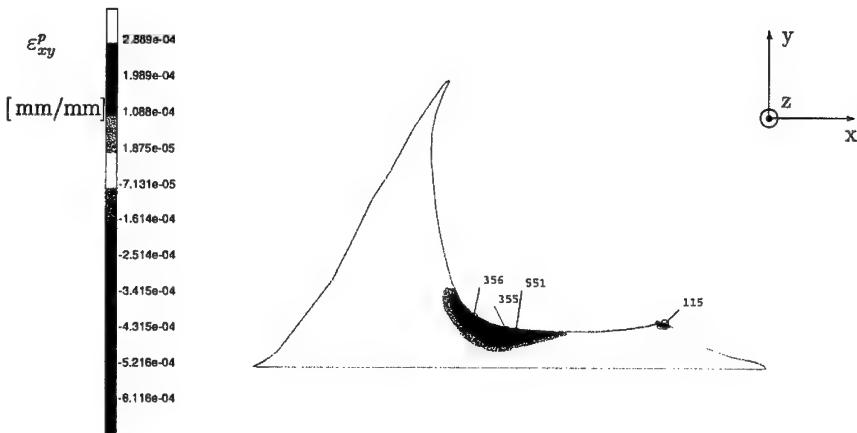


Abbildung 94: Contourplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

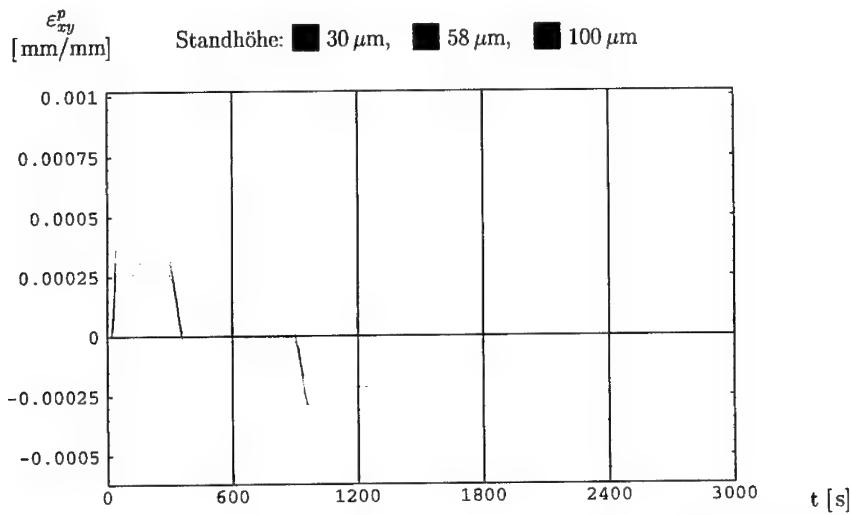


Abbildung 95: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 356 über die ersten fünf Temperaturzyklen

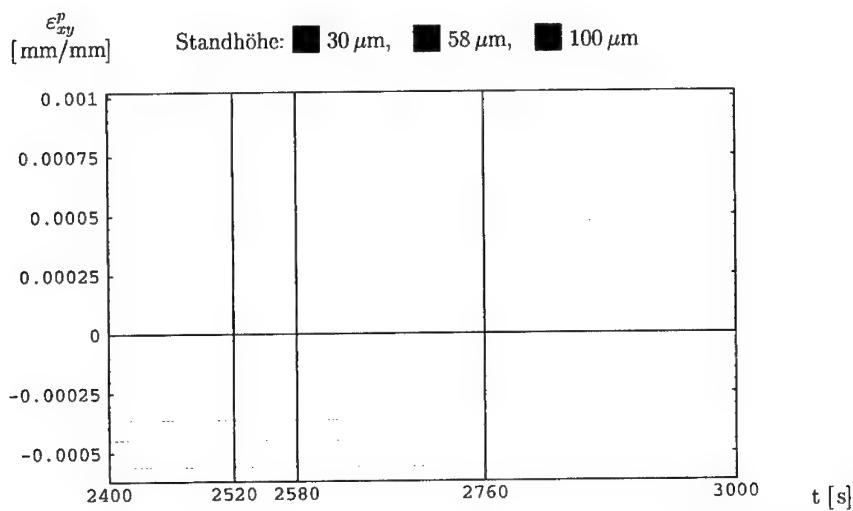


Abbildung 96: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 356 über den fünften Temperaturzyklus

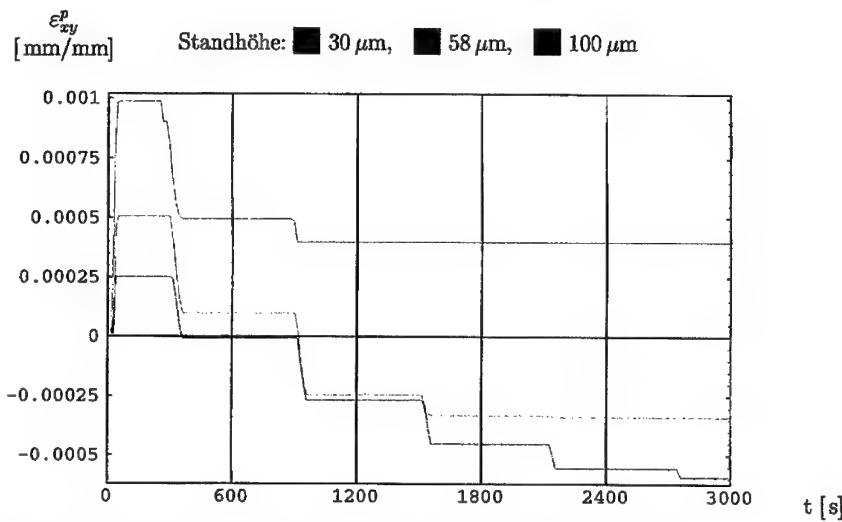


Abbildung 97: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 355 über die ersten fünf Temperaturzyklen

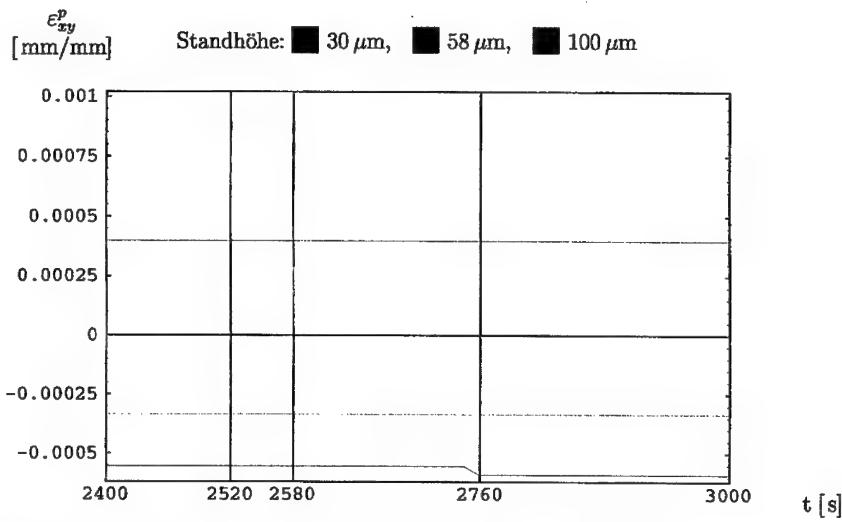


Abbildung 98: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 355 über den fünften Temperaturzyklus

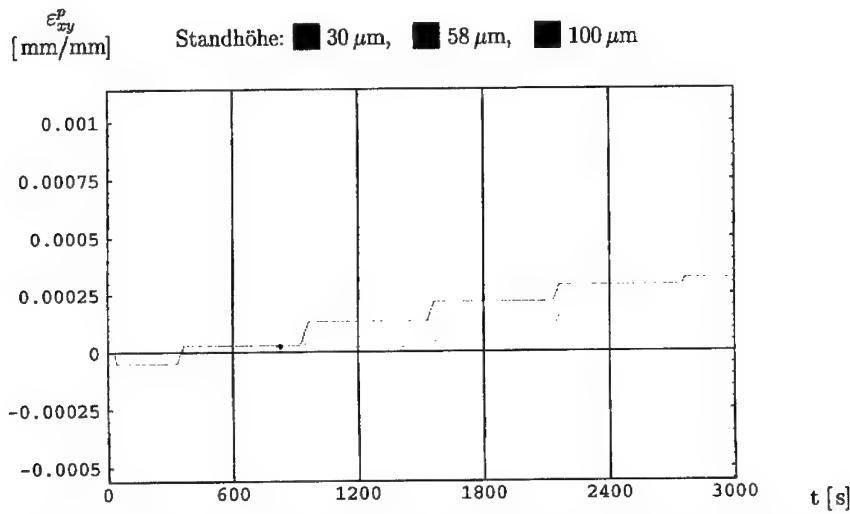


Abbildung 99: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 115 über die ersten fünf Temperaturzyklen

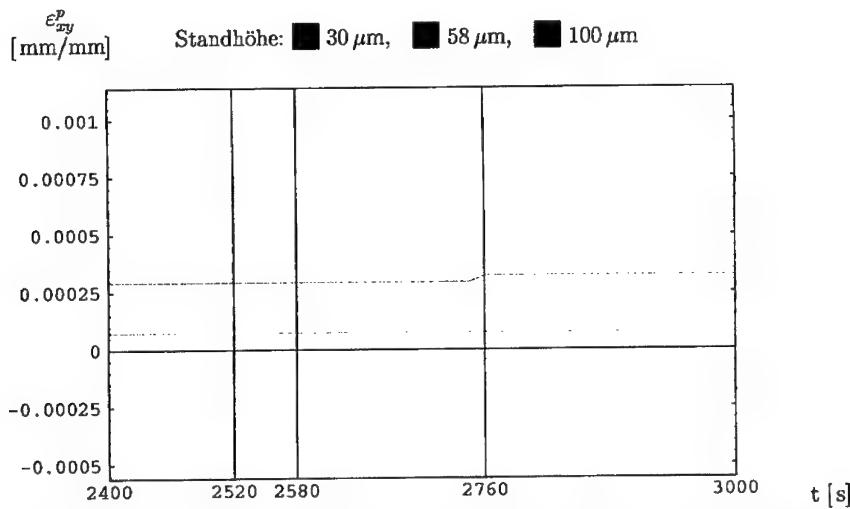


Abbildung 100: Transientenplot der plastischen Gleitungen ε_{xy}^p in der Darstellungsebene am Knoten 115 über den fünften Temperaturzyklus

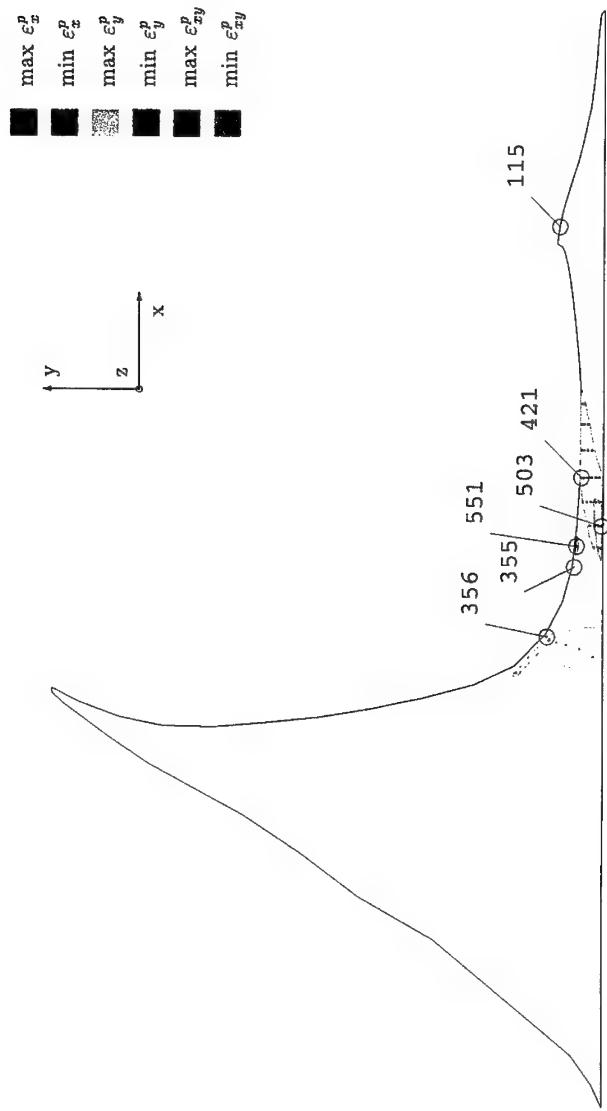


Abbildung 101: Lotbereiche mit extremen plastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30\mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

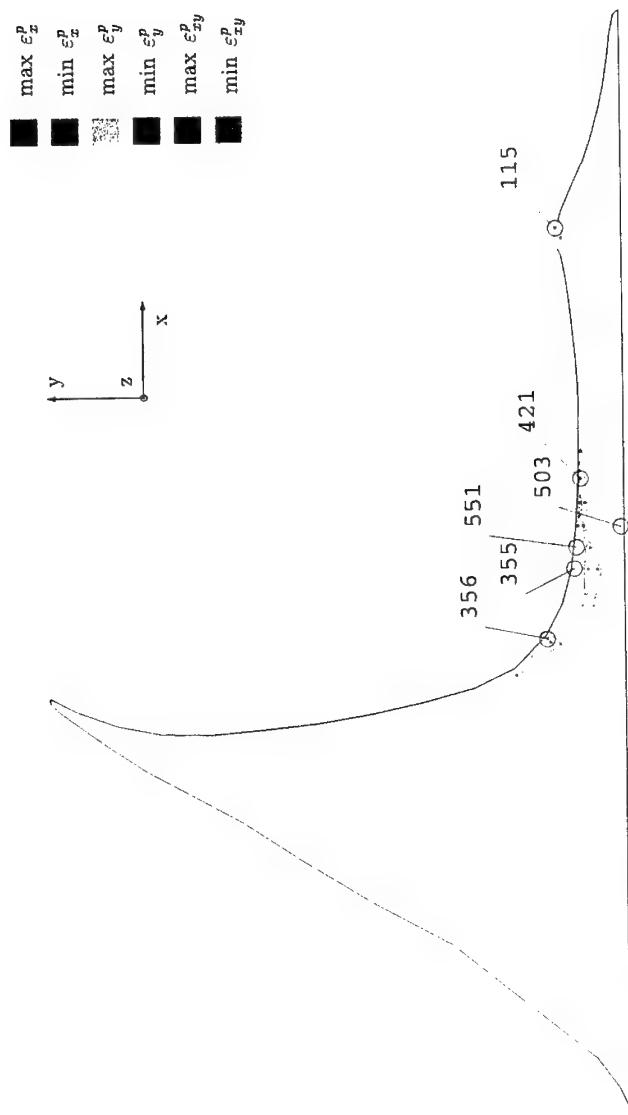


Abbildung 102: Lotbereiche mit extremen plastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

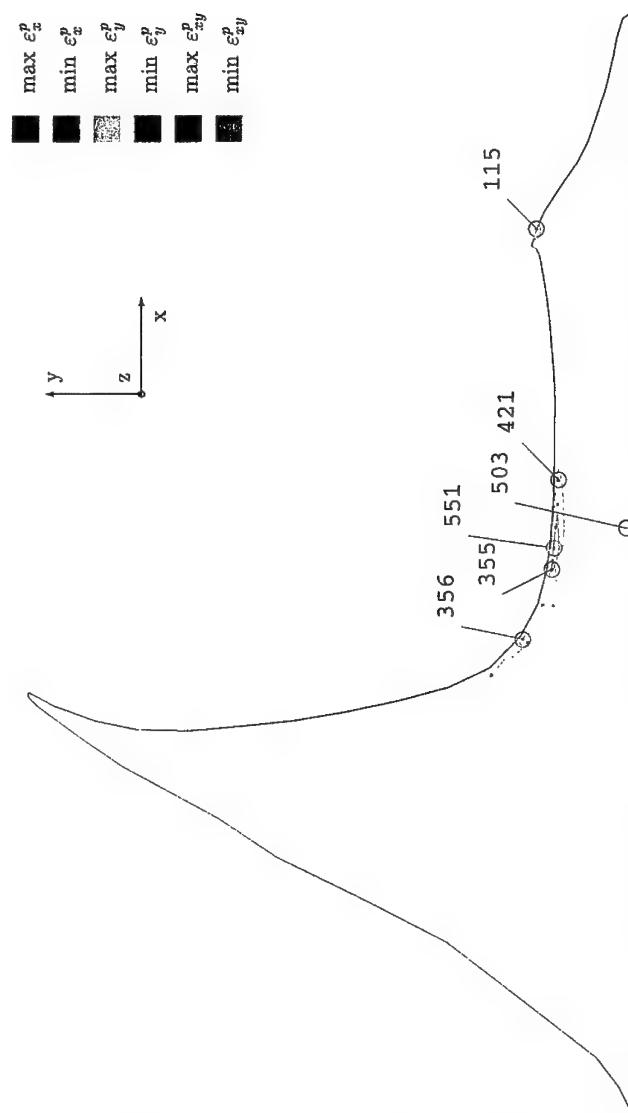


Abbildung 103: Lotbereiche mit extremen plastischen Dehnungen und Gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100\mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

6.5.4 Die Kriechdehnungen

6.5.4.1 Die Contourplots der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 106 – 109 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt. Auf den Abbildungen 104 und 105 sind Contourplots der Lötverbindung mit einer Standhöhe $30\text{ }\mu\text{m}$ und $58\text{ }\mu\text{m}$ zum Vergleich zu sehen.

1. Zunächst wird die Abhängigkeit der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung von der Standhöhe betrachtet. Diese Abhängigkeit lässt sich sehr gut anhand der Abbildungen 104 – 106, auf denen Contourplots der Modelle mit einer Standhöhe von $30\text{ }\mu\text{m}$, $58\text{ }\mu\text{m}$ und $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt sind, erläutern.

Bei großer Standhöhe erstreckt sich der Bereich großer positiver Kriechdehnungen in horizontaler Richtung über den relativ großen „trompetenförmigen“ Teilbereich in der Umgebung der Knoten 68 und 632 (Abb. 106). Bei mittlerer Standhöhe verschmälert sich dieser Bereich insbesondere im oberen Teil, in der Nähe von Knoten 632 (Abb. 105). Bei geringer Standhöhe konzentriert sich das Kriechdehnungsmaximum dieser Komponente auf einen kleineren Bereich in der Umgebung des Knotens 68, in der Nähe der linken unteren Ecke des SMC nahe an der Materialgrenze zur Nickel-Passivierungsschicht.

Ein Bereich großer negativer Kriechdehnungen in horizontaler Richtung wird ebenfalls mit abnehmender Standhöhe kleiner. Bei großer Standhöhe ist fast der gesamte Bereich des Lotpaltes — markiert durch die Knoten 57, 421, 513 und 638 — ein Bereich von Kriech-Stauchungen. Bei mittlerer Standhöhe trennt sich dieser auf in zwei Teilbereiche: Der Bereich in der Umgebung von Knoten 57 trennt sich von der Umgebung der anderen drei Knoten und bildet einen kleineren Teilbereich direkt unter der Ecke des SMC. Der zweite Bereich ist derjenige in der Umgebung der drei Knoten 421, 513 und 638. Dieser ist langgestreckt und befindet sich in der Nähe der Lotkehle. Bei geringer Standhöhe konzentriert sich der Bereich der negativen horizontalen Kriechdehnungen auf einen Bereich rechts unterhalb der Lotkehle, also im wesentlichen auf die Umgebung des Knotens 638.

2. Die Abhängigkeit der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung von der Zeit drückt sich in der Größe der auftretenden Werte aus: Sie variieren mit der Zeit ähnlich wie sich die Temperatur mit der Zeit ändert.

Die Verteilung hingegen bleibt, wie bereits eben geschildert, erhalten. Bei hohen Temperaturen kriecht das Lotmaterial am meisten (Abb. 106 und 107). Wird die Temperatur auf den unteren Umkehrpunkt gesenkt, so gehen die Kriechdehnungen um etwa 30% zurück (Abb. 108 und 109).

6.5.4.2 Die Transientenplots der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung sind auf den Abbildungen 110 – 121 dargestellt. In der Regel gilt: Je geringer die Standhöhe, desto größer sind die Kriechdehnungen dem Betrage nach. Die Kriechdehnungen variieren mit der Zeit ähnlich wie sich die Temperatur mit der Zeit ändert. Jedoch beginnen die Kriechdehnungen beim Ansteigen der Temperatur erst nach einer zeitlichen Verzögerung zu wachsen.

6.5.4.3 Die Contourplots der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung sind exemplarisch auf den Abbildungen 122 und 123 für die Lötverbindung mit den Standhöhen von $30\text{ }\mu\text{m}$ und $100\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

Für die Kriechdehnungen in vertikaler Richtung gilt das Gleiche wie für die in horizontaler Richtung. Vom Betrag her sind die Kriechdehnungen in vertikaler Richtung jedoch etwa 5% geringer.

6.5.4.4 Die Transientenplots der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung sind auf den Abbildungen 124 – 131 dargestellt. Stellvertretend für die Verhältnisse an den Knoten 422, 512, 638 und 442 ist der Transientenplot am Knoten 638 (vgl. Abb. 131) wiedergegeben.

Bemerkenswert ist die Entwicklung der vertikalen Kriechdehnungen am Knoten 356. Während des Temperaturzyklusabschnittes t_{an} nimmt die Kriechdehnung zunächst ca. 70 Sekunden lang ab, um dann bis zum Ende des Temperaturanstiegs in weiteren 50 Sekunden stark zuzunehmen und ihr Maximum zu erreichen. Der Grund hierfür ist in dem unter anderem von der Temperatur abhängigen Kriechverhalten von Lot zu sehen. Im ersten Teil des Temperaturanstiegs herrschen im Lot noch relativ niedrige homologe Temperaturen, so daß die elastischen und plastischen Eigenschaften in diesem Abschnitt in den Vordergrund treten. Dann jedoch wird das Lot bei zunehmender Temperatur zunehmend "weicher", so daß die Kriecheigenschaften von Lot dominieren.

6.5.4.5 Die Kriechgleitungen in der Darstellungsebene sind auf den Abbildungen 132 – 135 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von 58 μm dargestellt. Auf den Abbildungen 136 und 137 sind Contourplots der Lötverbindung mit einer Standhöhe 30 μm respektive 100 μm zum Vergleich zu sehen.

1. Die Kriechgleitungen ändern sich deutlich während des Temperaturzyklus. Dieses wird am Beispiel der positiven Kriechgleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von 58 μm anhand der Abbildungen 132, 133, 134 und 135 erläutert:

Die Kriechgleitungen nehmen während der Betriebsphase ($T = +80^\circ\text{C}$) von $t = t_1$ bis $t = t_2$, also innerhalb von 60 Sekunden, um 0,086 $^\circ$ zu. In der 180 Sekunden dauernden Abkühlphase nach dem Ausschalten von $t = t_2$ bis $t = t_3$ nehmen die Kriechgleitungen um 0,17 $^\circ$ ab und nehmen während der Ruephase von 240 Sekunden Dauer um weitere 0,017 $^\circ$ ab. Schließlich beginnt der Zyklus mit dem Einschaltvorgang wieder von vorn. In jedem Temperaturzyklus verwindet sich das Lotmaterial der Lötverbindung also mindestens um 0,18 $^\circ$.

2. Die Standhöhe bestimmt wesentlich die Lage der maximalen positiven Kriechgleitungen in der Darstellungsebene wie bei einem Vergleich der drei Abbildungen 136, 133 und 137 deutlich wird:

Bei geringer Standhöhe (30 μm) ist das Maximum in der Nähe der Nickel-Passivierungsschicht lokalisiert. Bei mittlerer Standhöhe (58 μm) bildet sich ein zweites Maximum positiver Kriechgleitungen in der Darstellungsebene in der Nähe der Kupfer-Lötlandefläche weiter links aus. Bei großer Standhöhe (100 μm) wird das zweite Maximum noch ausgeprägter, während gleichzeitig das erste stark zurückgeht und schließlich verschwindet.

6.5.4.6 Die Transientenplots der Kriechgleitungen in der Darstellungsebene sind auf den Abbildungen 138 – 149 dargestellt.

6.5.4.7 Überblick über die Bereiche extremer Kriechdehnungen ist auf der Abbildung 150 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$, auf der Abbildung 151 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$ und auf der Abbildung 152 für die Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$ dargestellt.

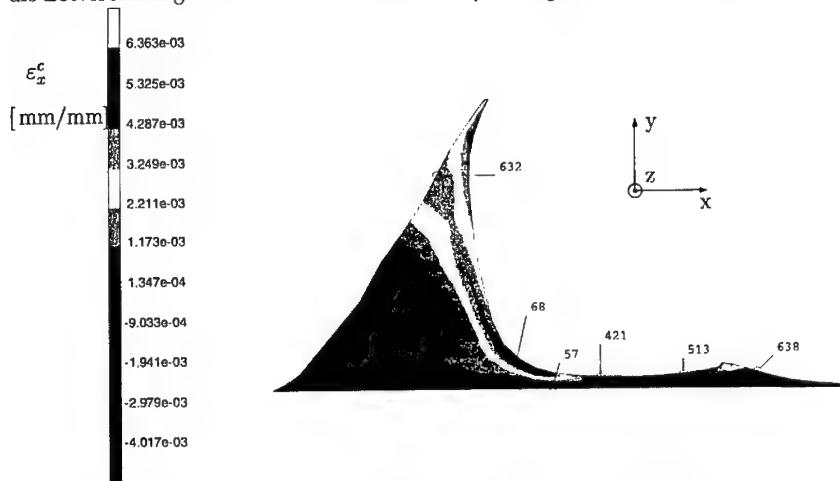


Abbildung 104: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

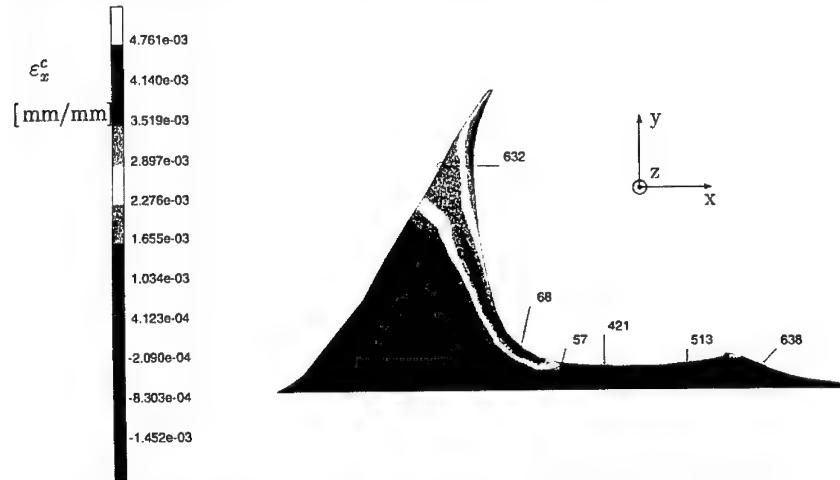


Abbildung 105: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

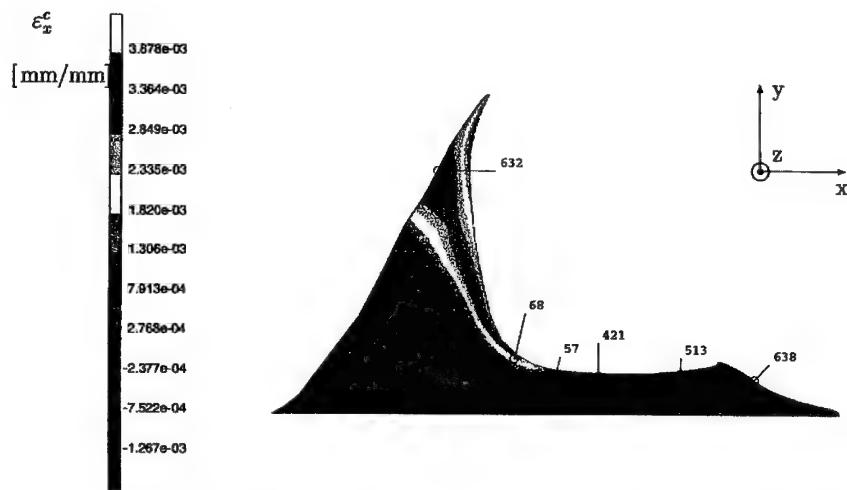


Abbildung 106: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

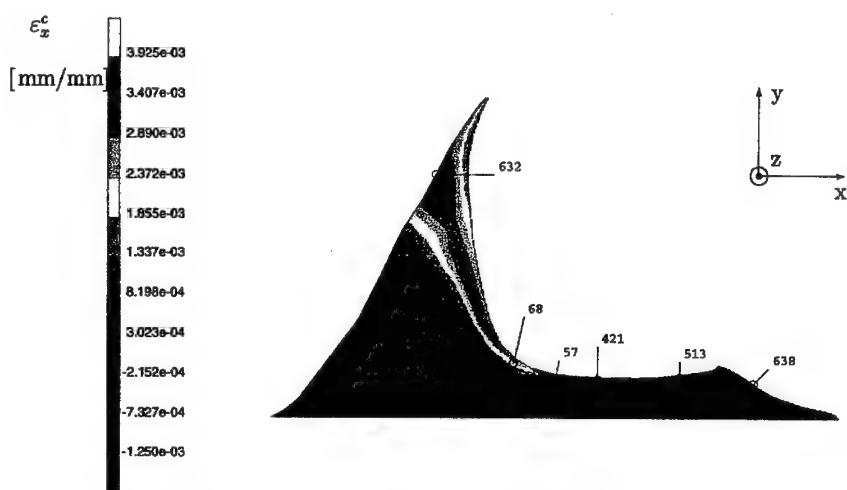


Abbildung 107: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_2$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

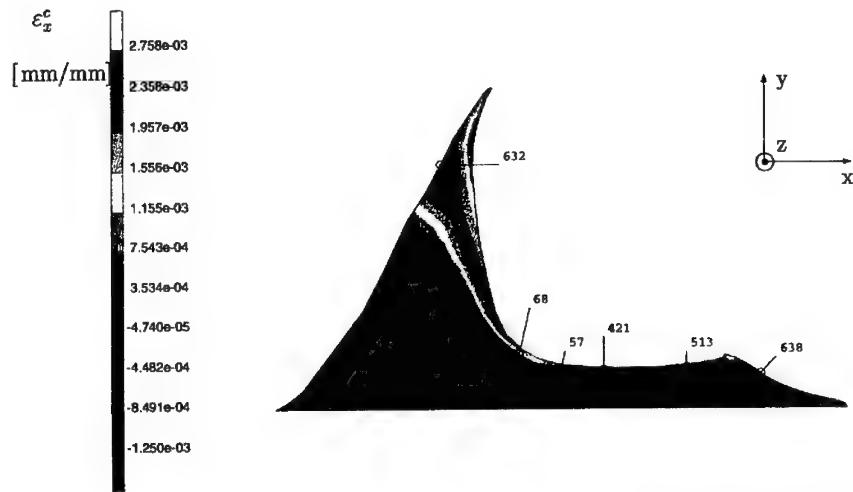


Abbildung 108: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_3$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

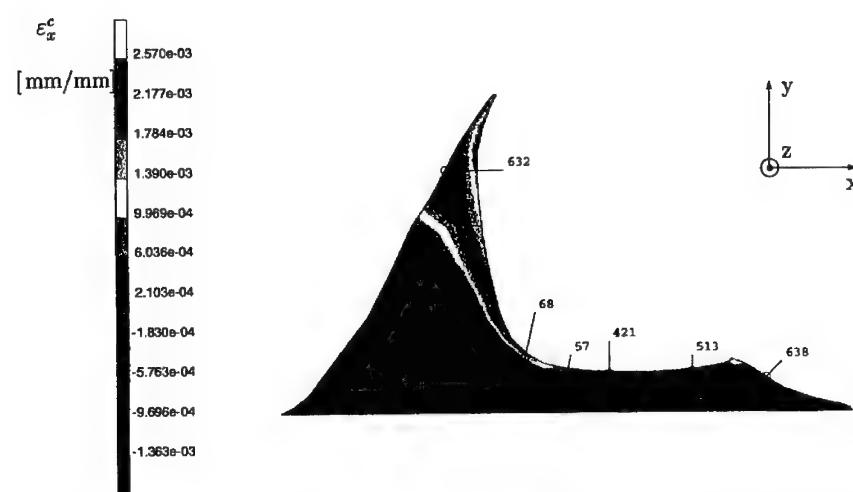


Abbildung 109: Contourplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_4$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

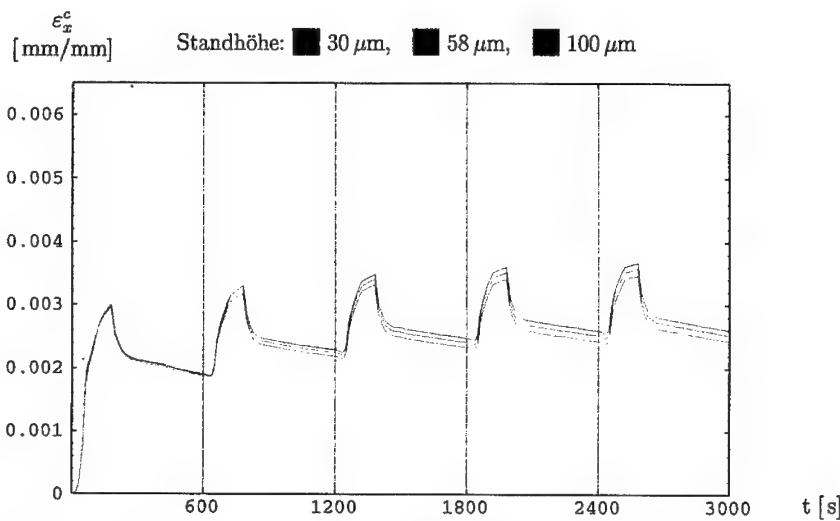


Abbildung 110: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 632 über die ersten fünf Temperaturzyklen

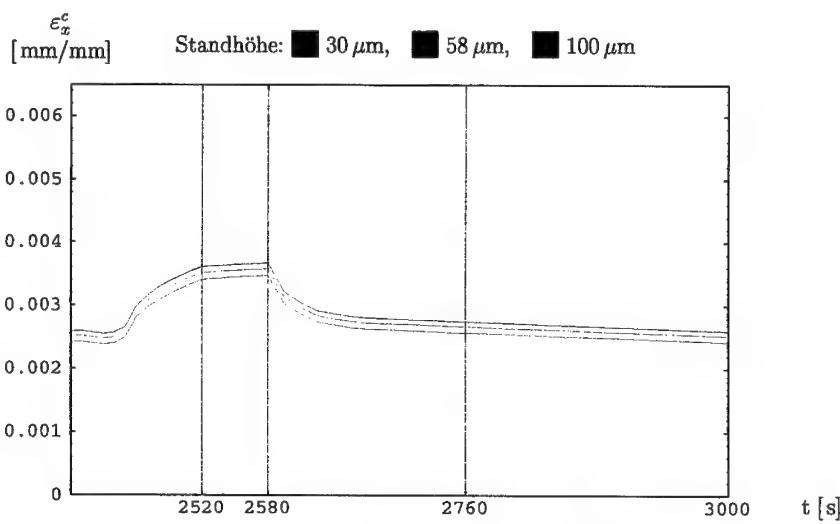


Abbildung 111: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 632 über den fünften Temperaturzyklus

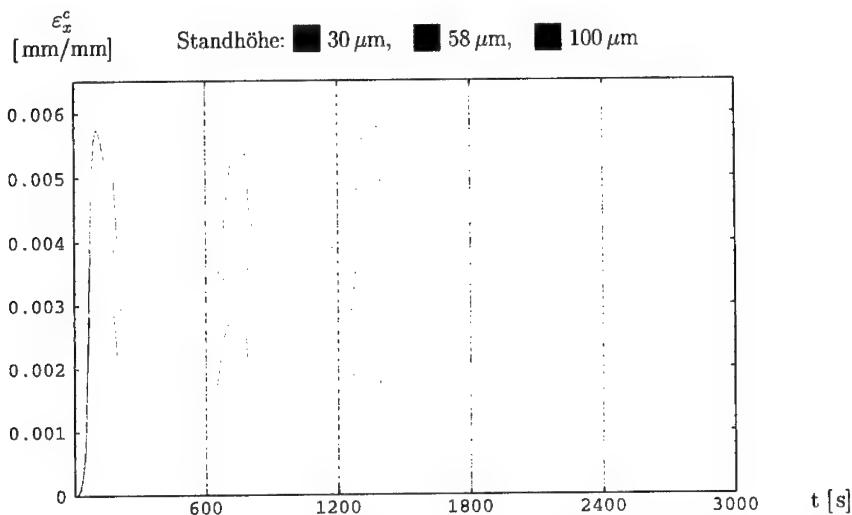


Abbildung 112: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 068 über die ersten fünf Temperaturzyklen

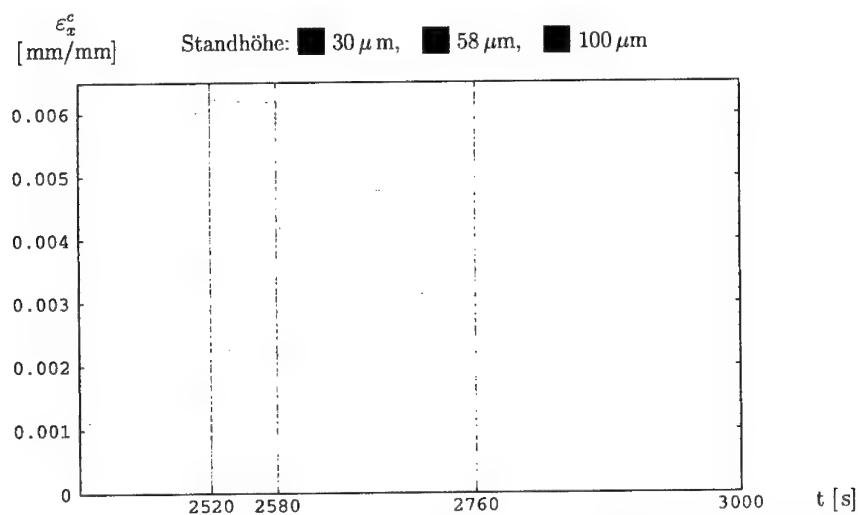


Abbildung 113: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 068 über den fünften Temperaturzyklus

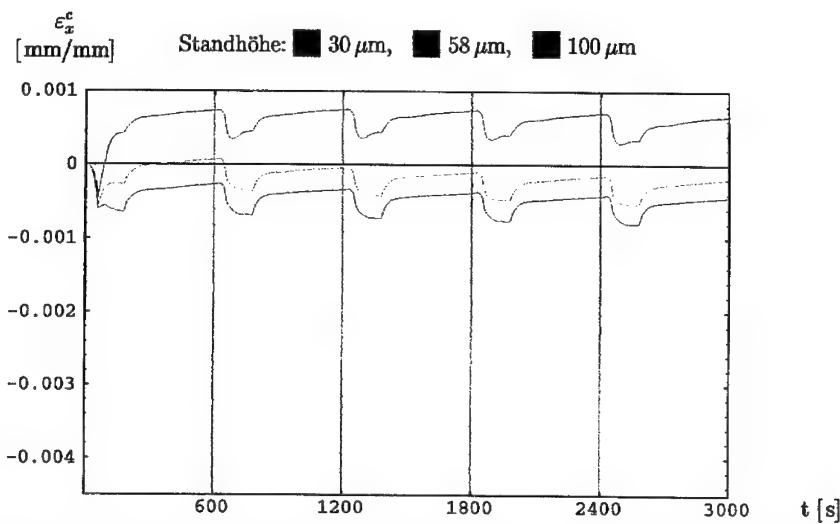


Abbildung 114: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 421 über die ersten fünf Temperaturzyklen

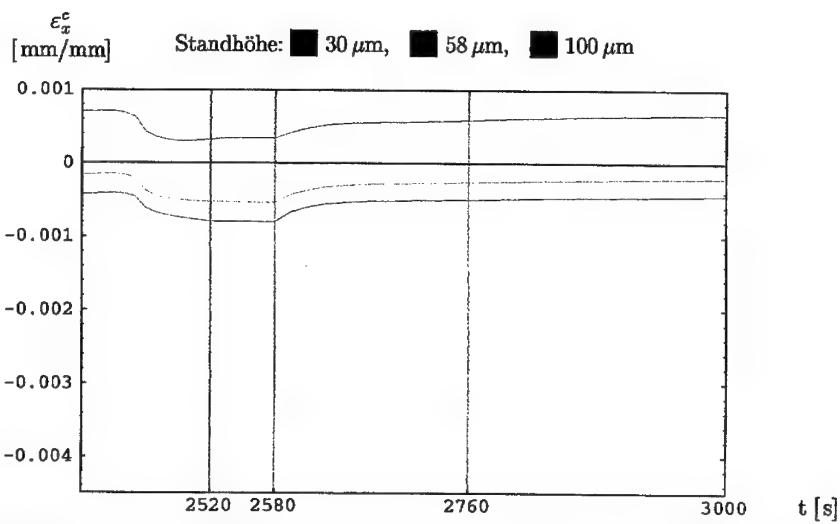


Abbildung 115: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 421 über den fünften Temperaturzyklus

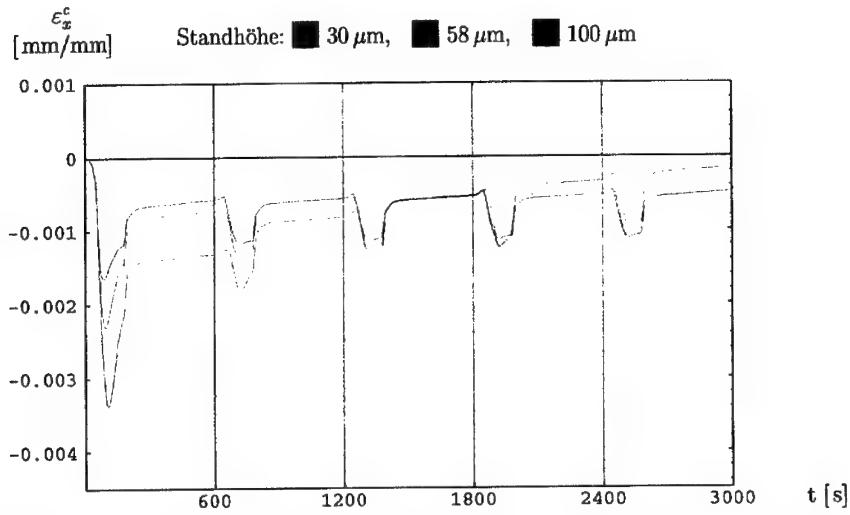


Abbildung 116: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 513 über die ersten fünf Temperaturzyklen

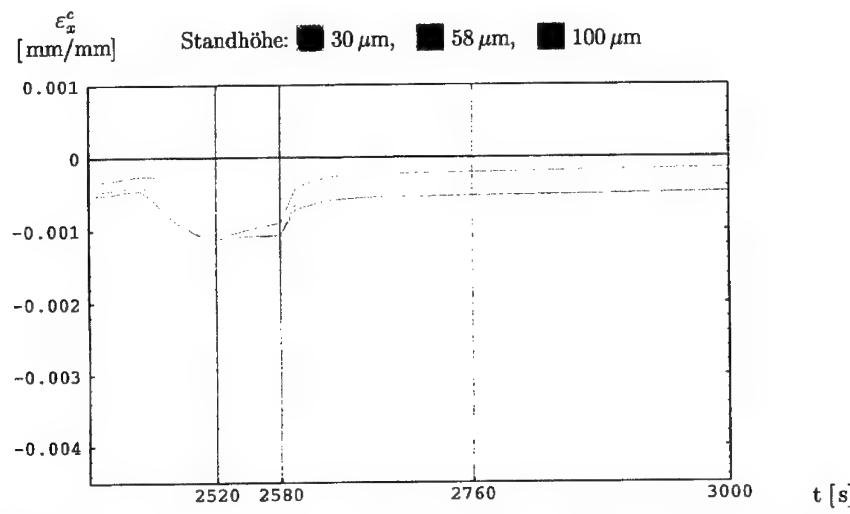


Abbildung 117: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 513 über den fünften Temperaturzyklus

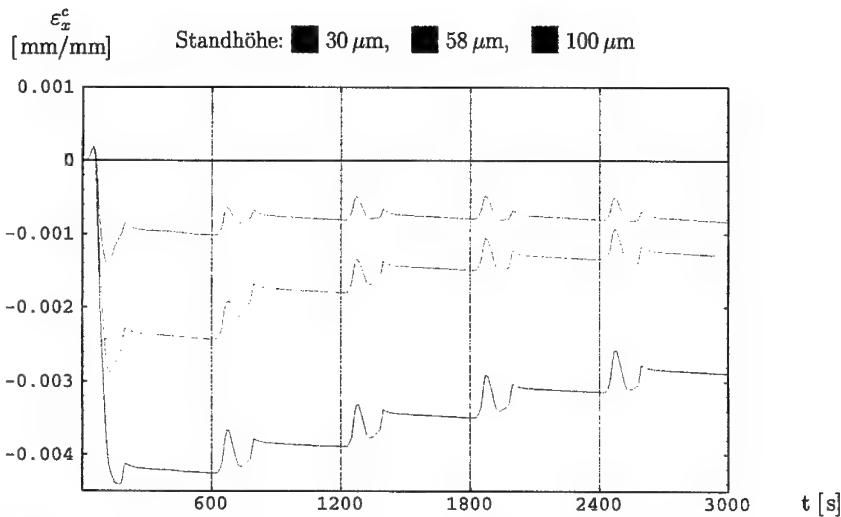


Abbildung 118: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 638 über die ersten fünf Temperaturzyklen

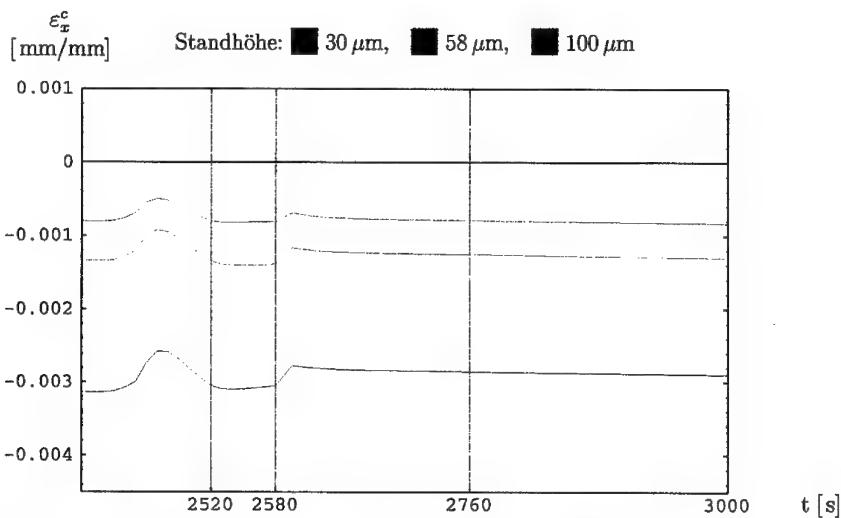


Abbildung 119: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 638 über den fünften Temperaturzyklus

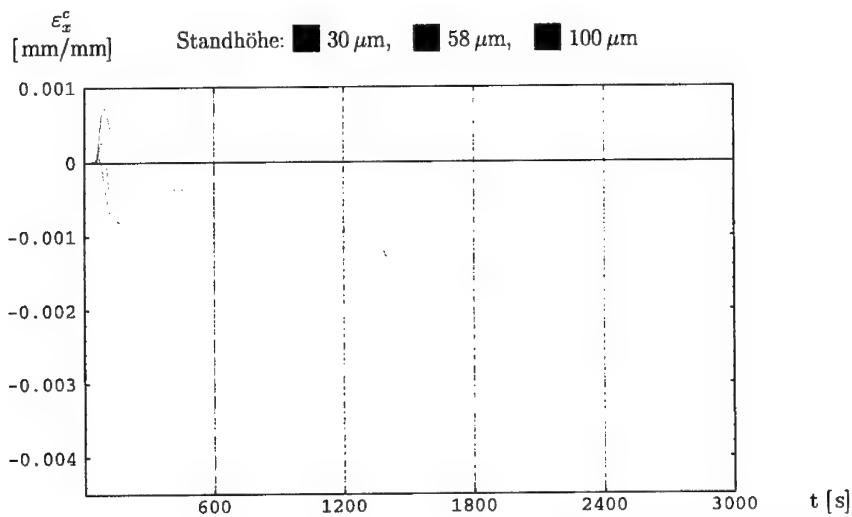


Abbildung 120: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 057 über die ersten fünf Temperaturzyklen

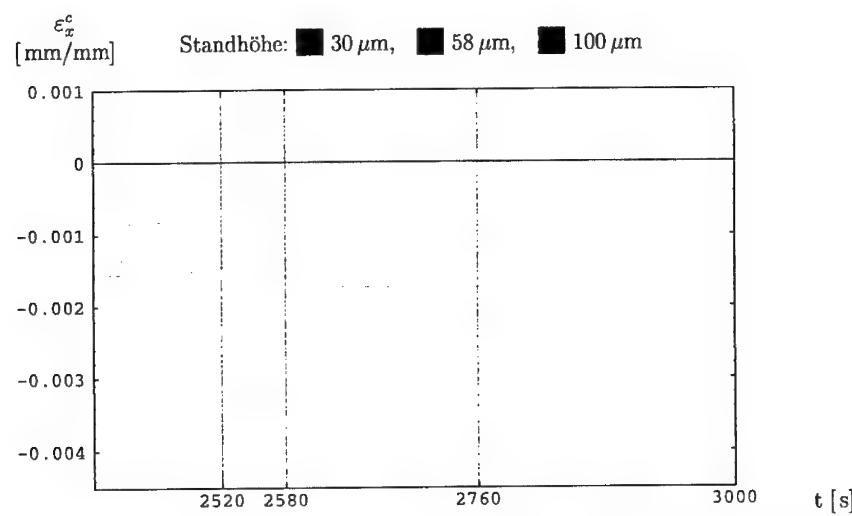


Abbildung 121: Transientenplot der Kriechdehnungen in horizontaler Richtung ε_x^c am Knoten 057 über den fünften Temperaturzyklus

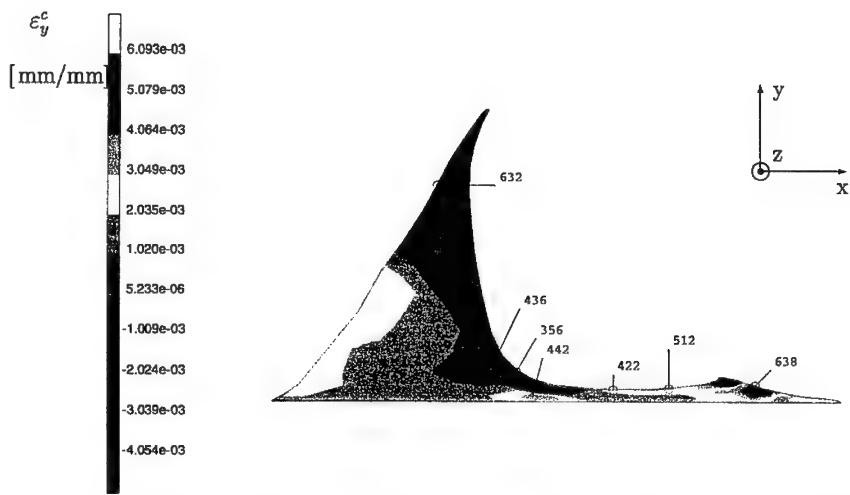


Abbildung 122: Contourplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

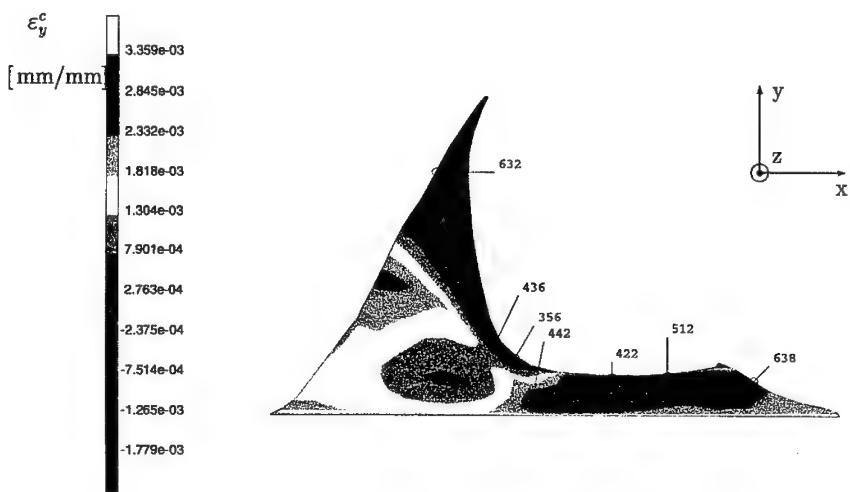


Abbildung 123: Contourplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

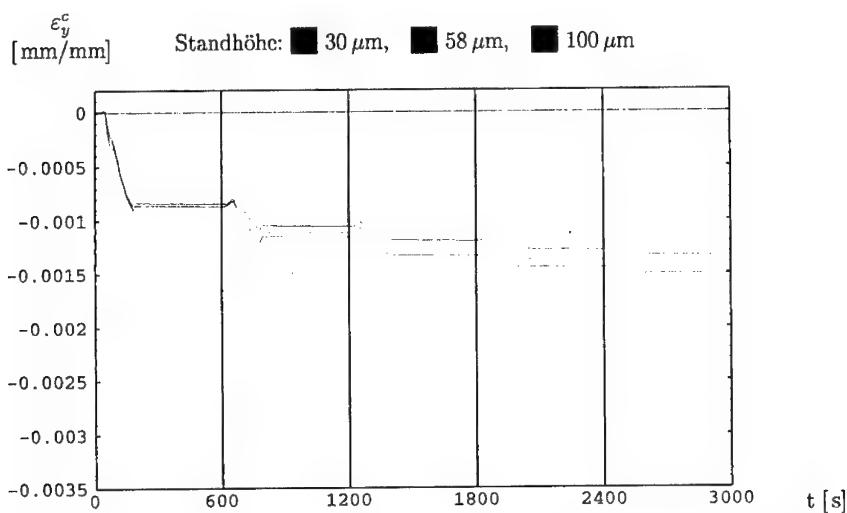


Abbildung 124: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 632 über die ersten fünf Temperaturzyklen

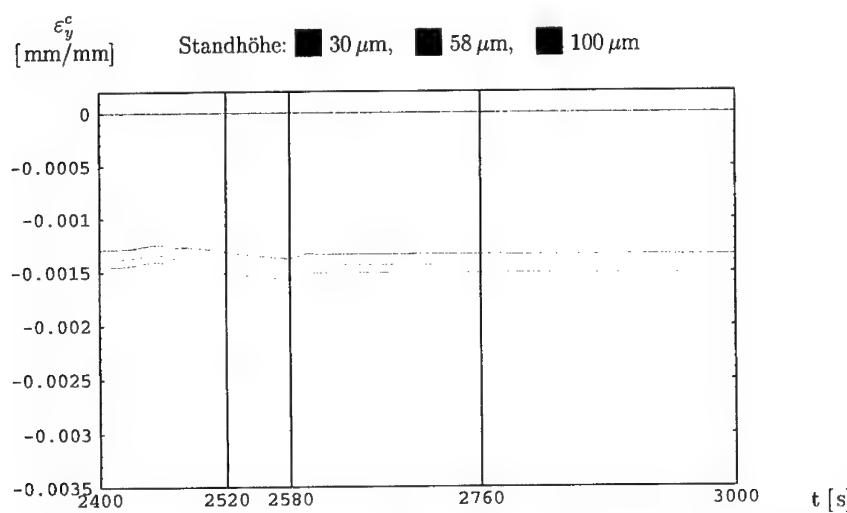


Abbildung 125: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 632 über den fünften Temperaturzyklus

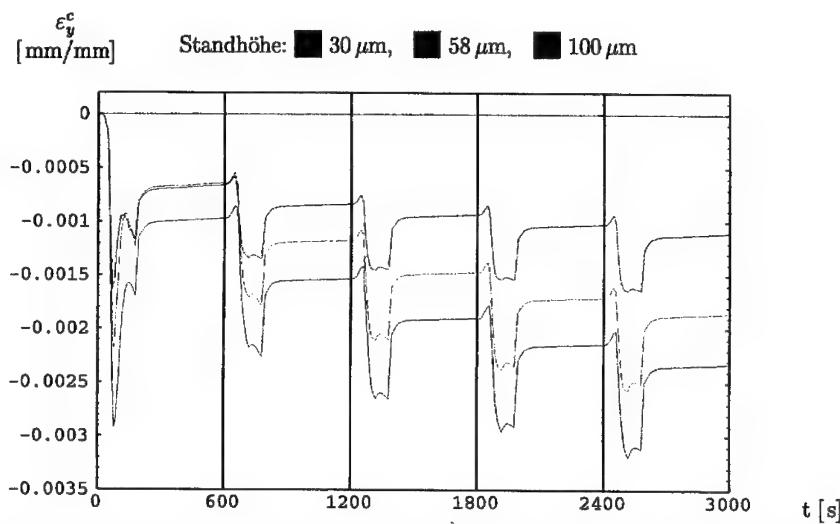


Abbildung 126: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 436 über die ersten fünf Temperaturzyklen

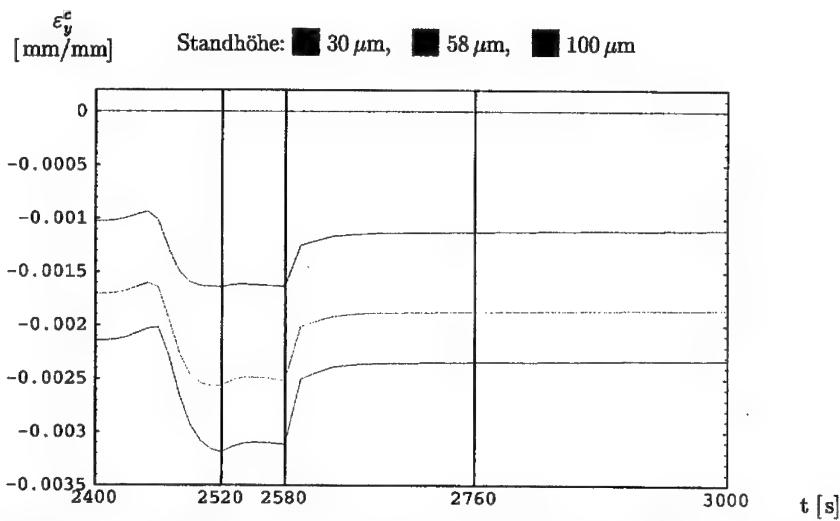


Abbildung 127: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 436 über den fünften Temperaturzyklus

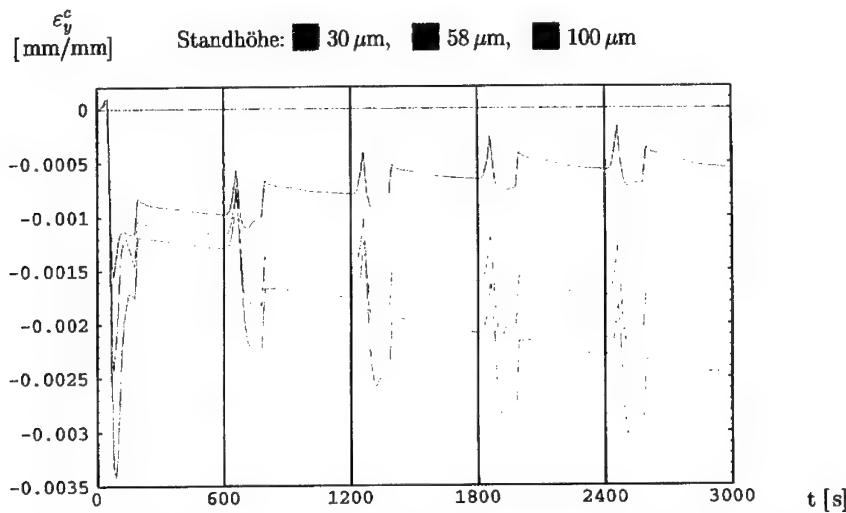


Abbildung 128: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 356 über die ersten fünf Temperaturzyklen

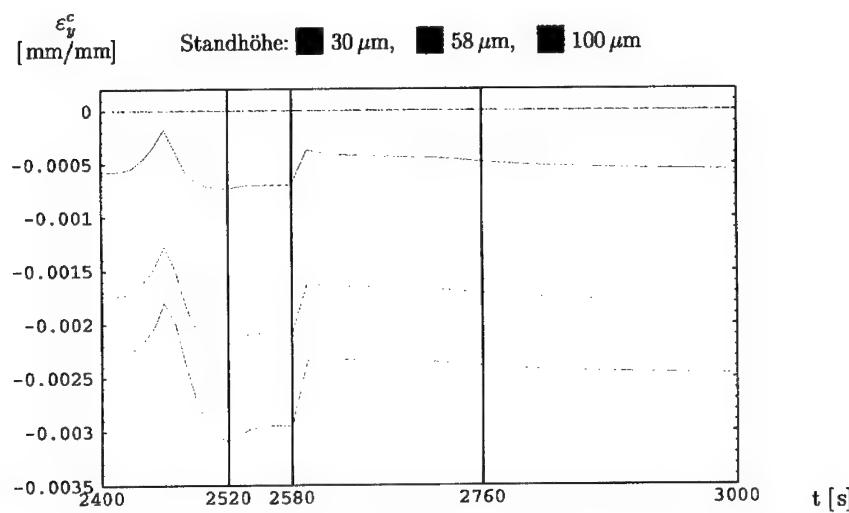


Abbildung 129: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 356 über den fünften Temperaturzyklus

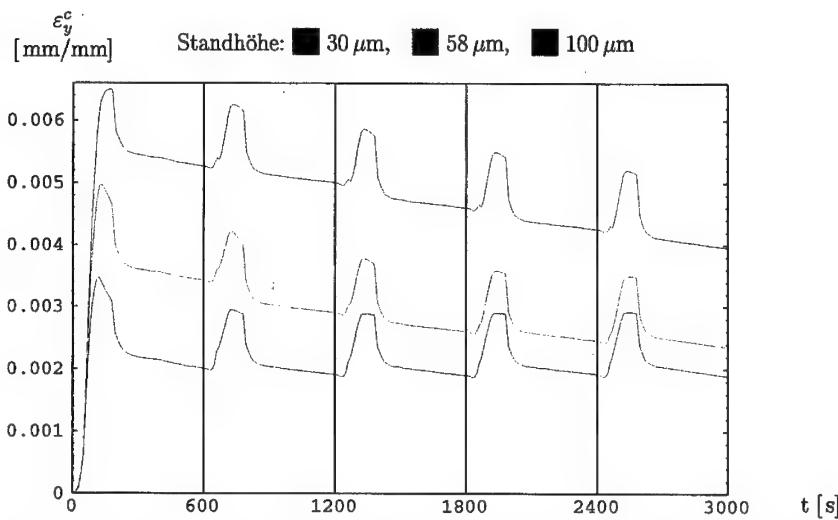


Abbildung 130: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 638 über die ersten fünf Temperaturzyklen

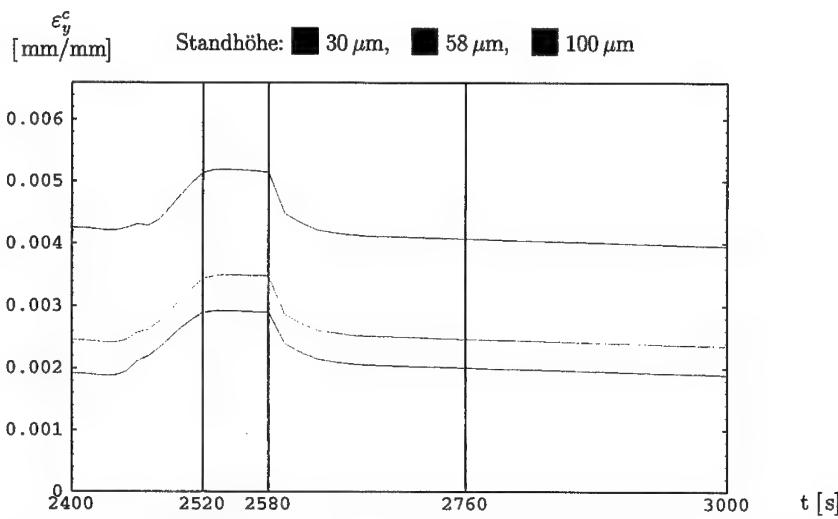


Abbildung 131: Transientenplot der Kriechdehnungen in vertikaler Richtung ε_y^c am Knoten 638 über den fünften Temperaturzyklus

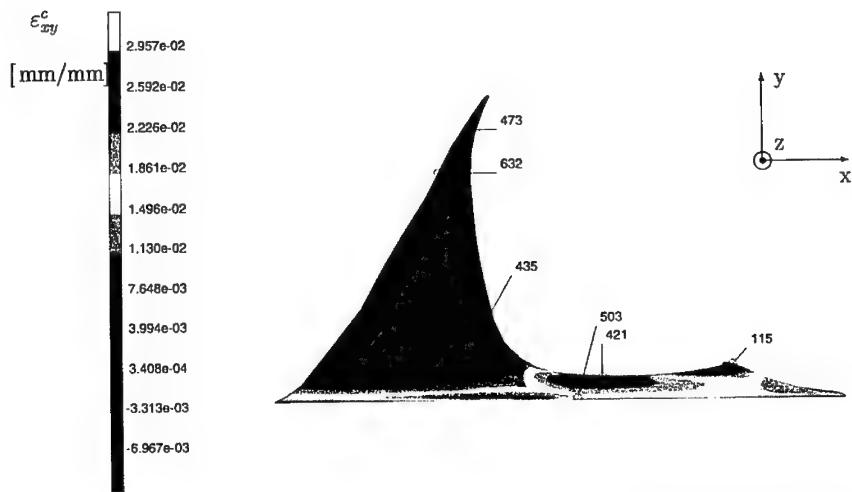


Abbildung 132: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_1$ bei einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

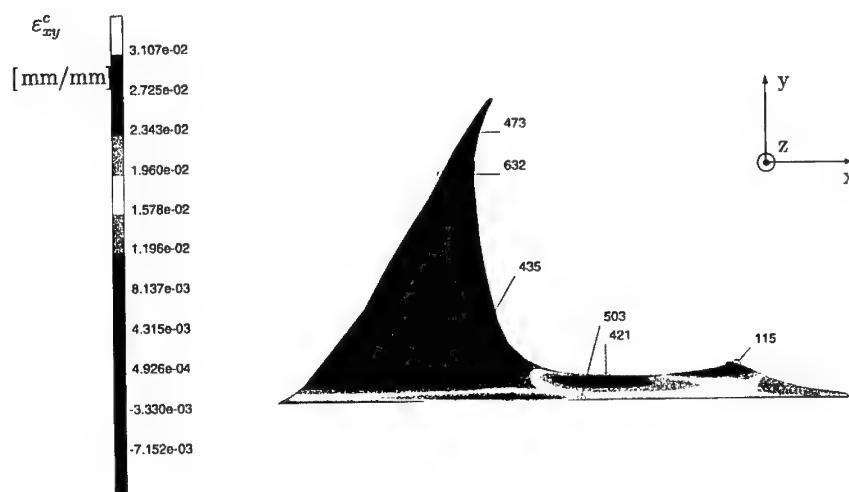


Abbildung 133: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_2$ bei einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

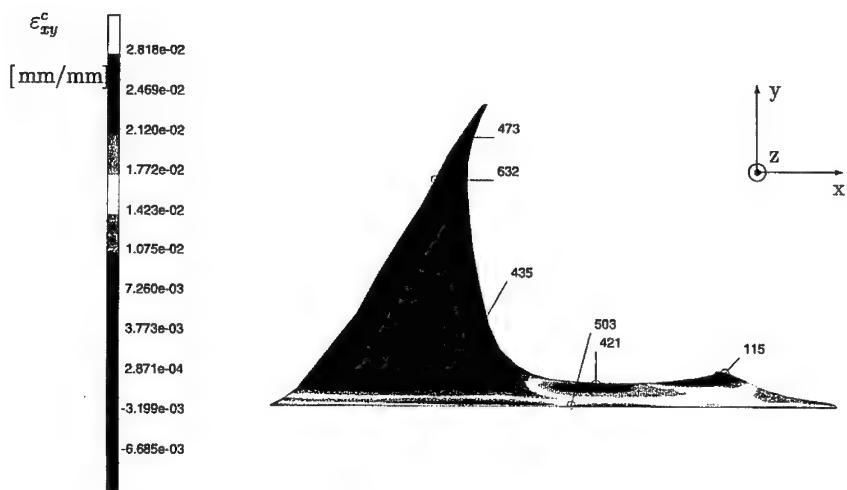


Abbildung 134: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_3$ bei einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

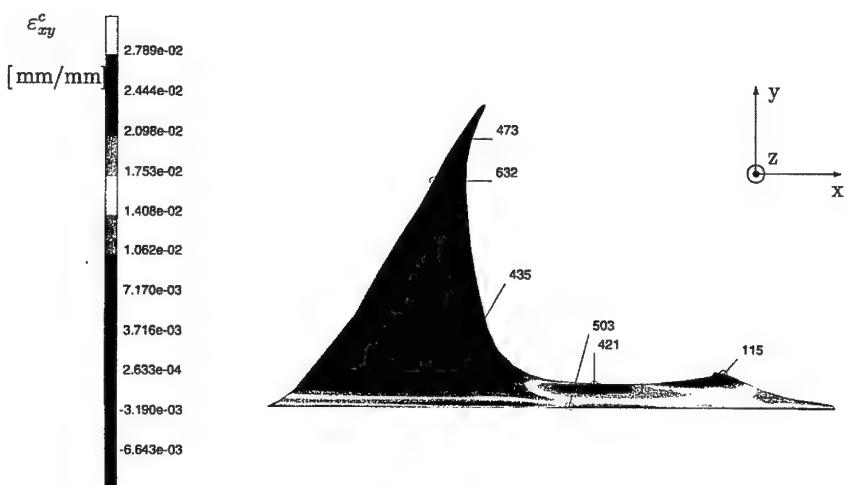


Abbildung 135: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_4$ bei einer Standhöhe von $58 \mu\text{m}$

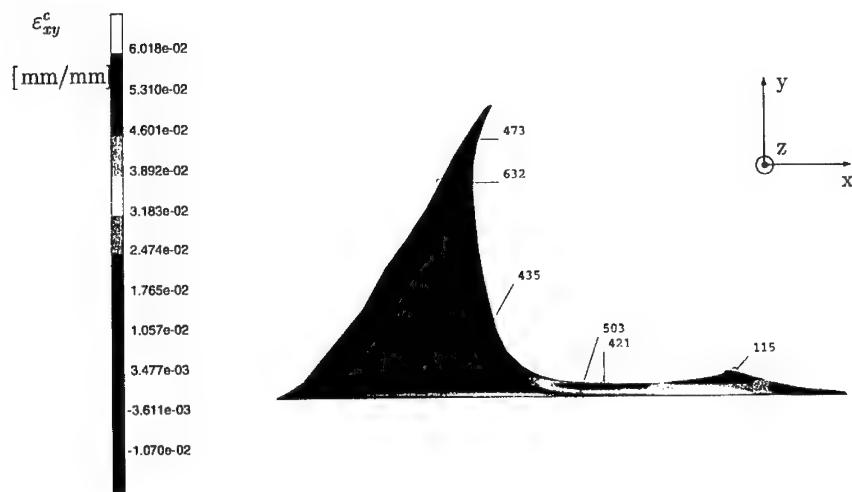


Abbildung 136: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_2$ bei einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$

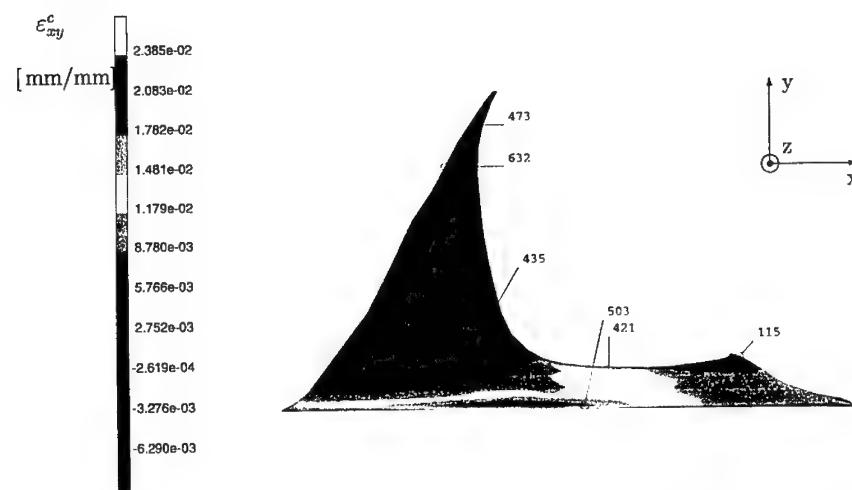


Abbildung 137: Contourplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene im Bereich des Lotmaterials zur Zeit $t = t_2$ bei einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$

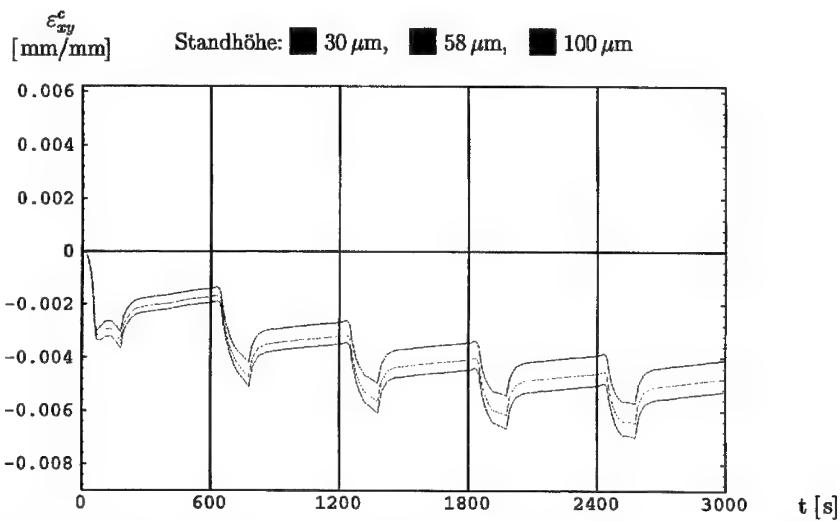


Abbildung 138: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 473 über die ersten fünf Temperaturzyklen

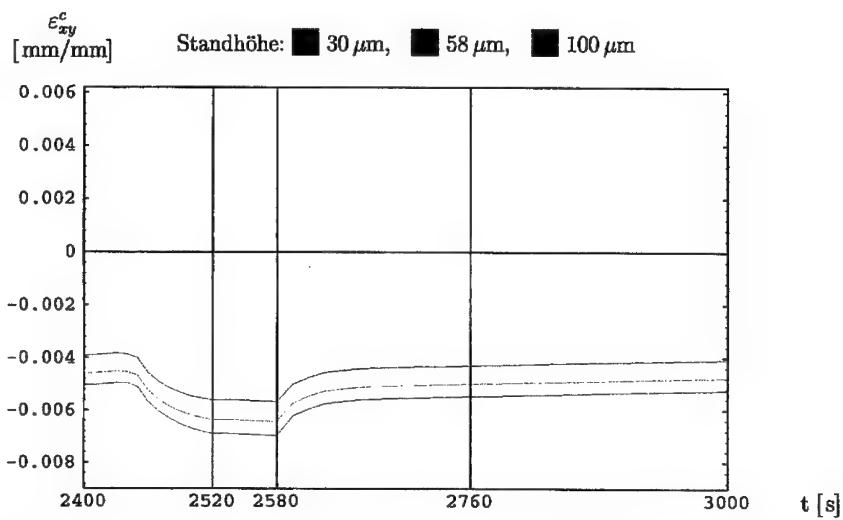


Abbildung 139: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 473 über den fünften Temperaturzyklus

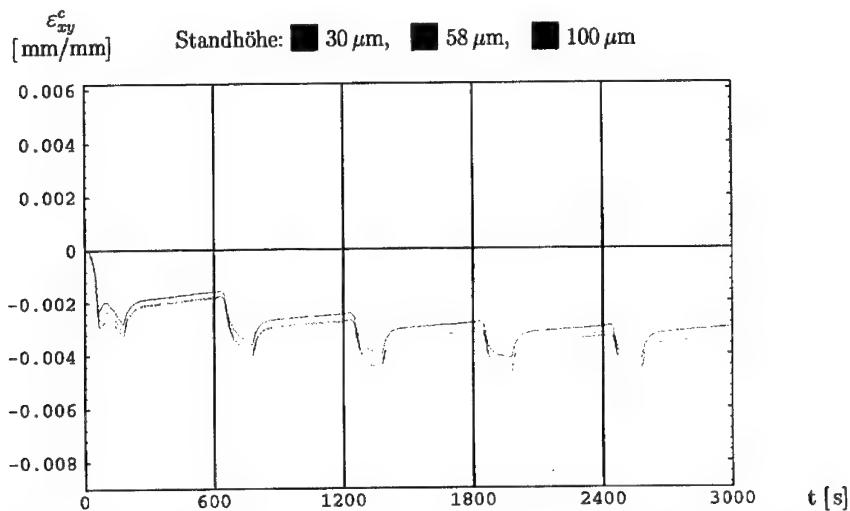


Abbildung 140: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 632 über die ersten fünf Temperaturzyklen

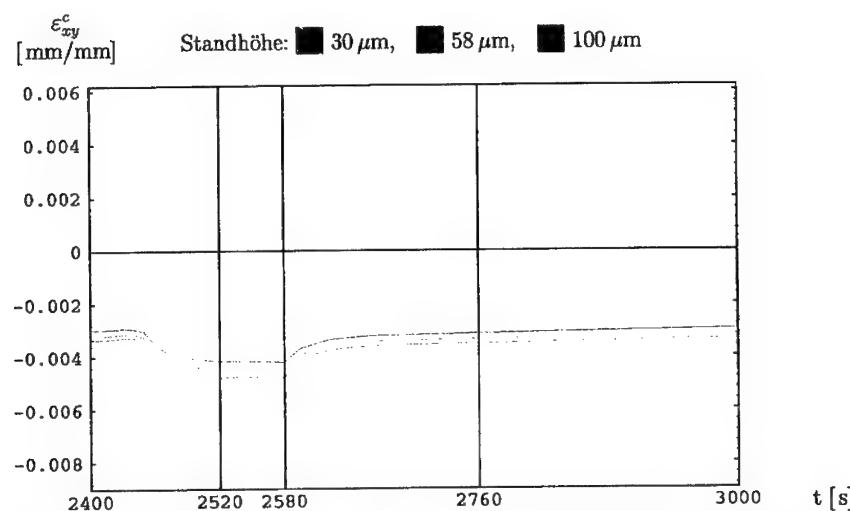


Abbildung 141: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 632 über den fünften Temperaturzyklus

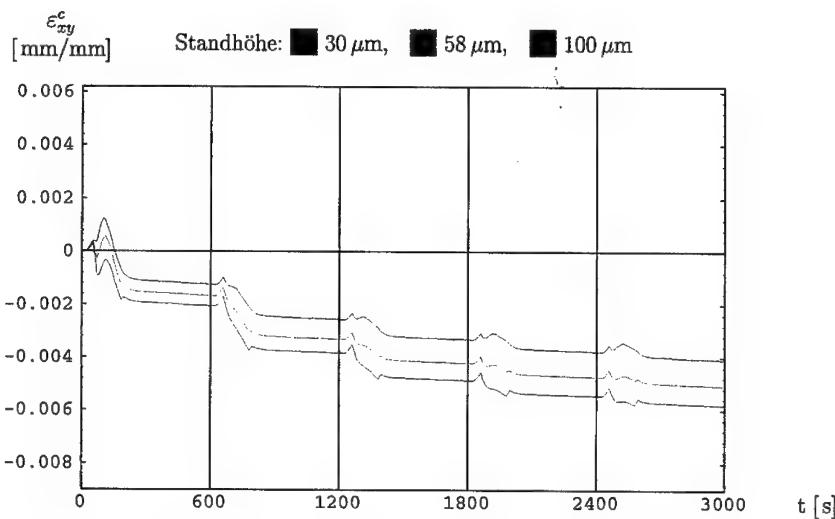


Abbildung 142: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 435 über die ersten fünf Temperaturzyklen

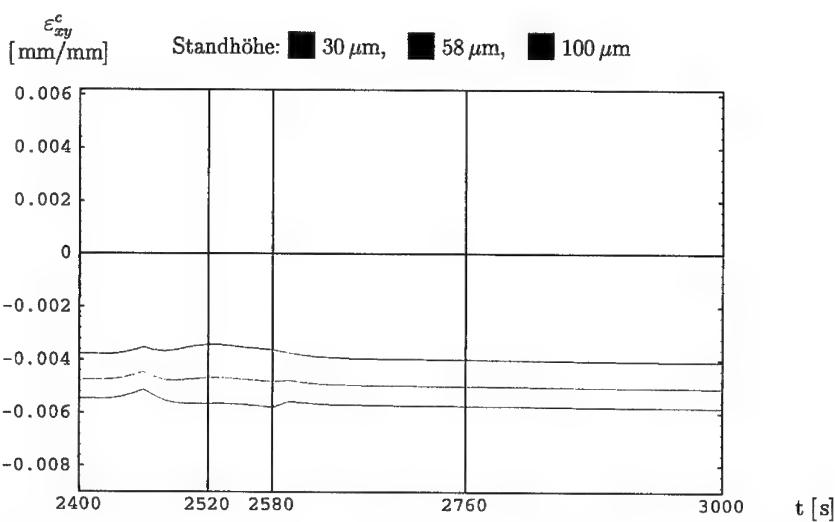


Abbildung 143: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 435 über den fünften Temperaturzyklus

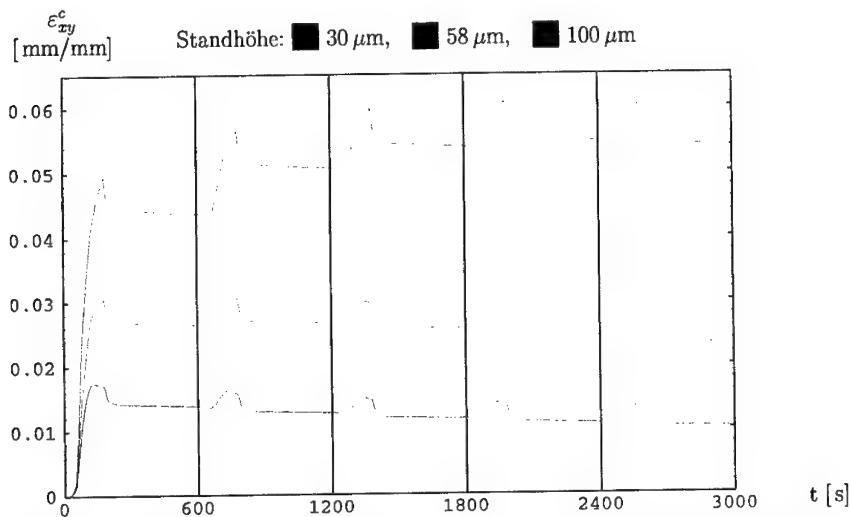


Abbildung 144: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 421 über die ersten fünf Temperaturzyklen

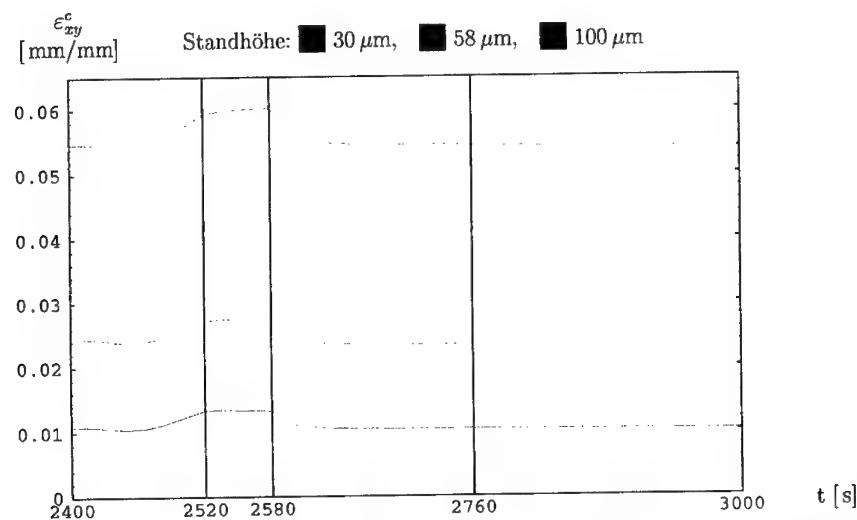


Abbildung 145: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 421 über den fünften Temperaturzyklus

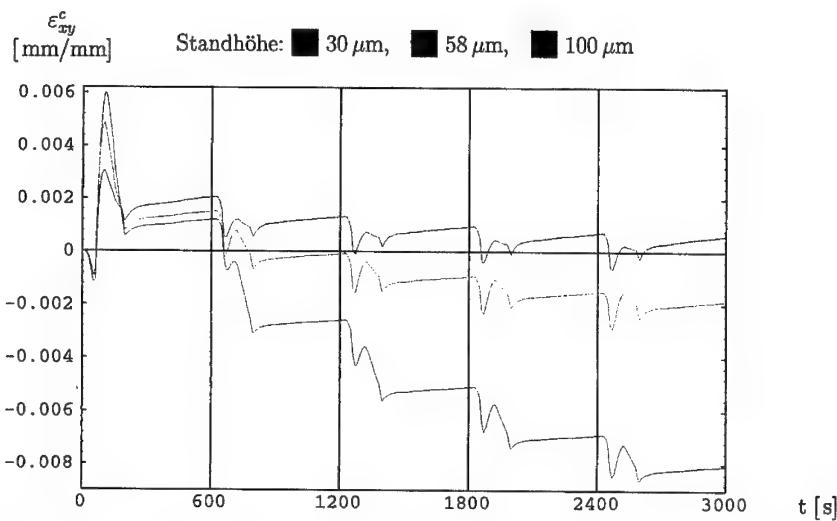


Abbildung 146: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 115 über die ersten fünf Temperaturzyklen

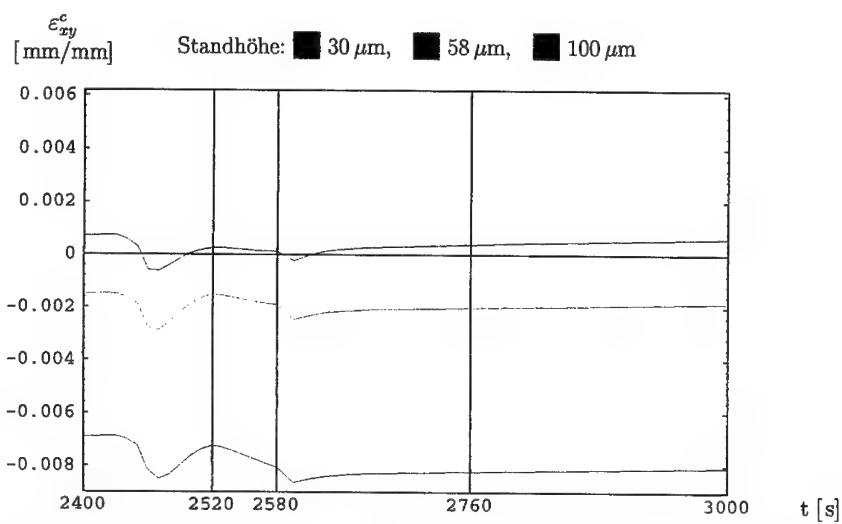


Abbildung 147: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 115 über den fünften Temperaturzyklus

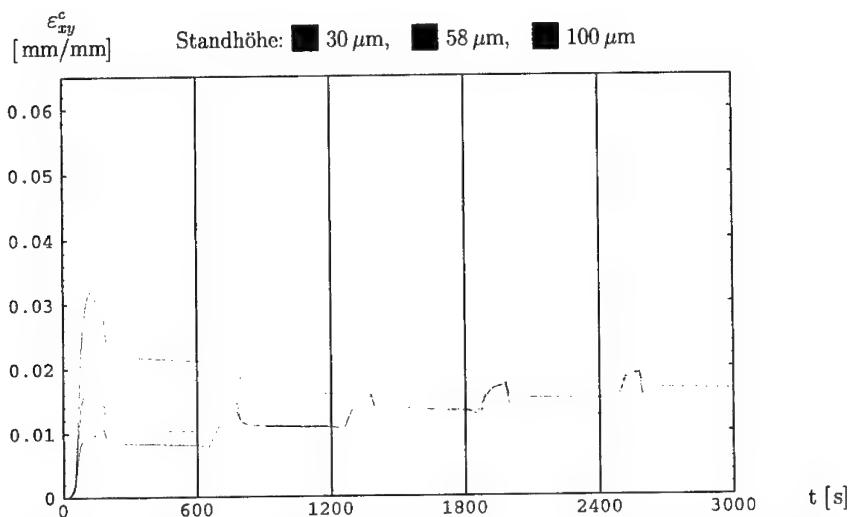


Abbildung 148: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 503 über die ersten fünf Temperaturzyklen

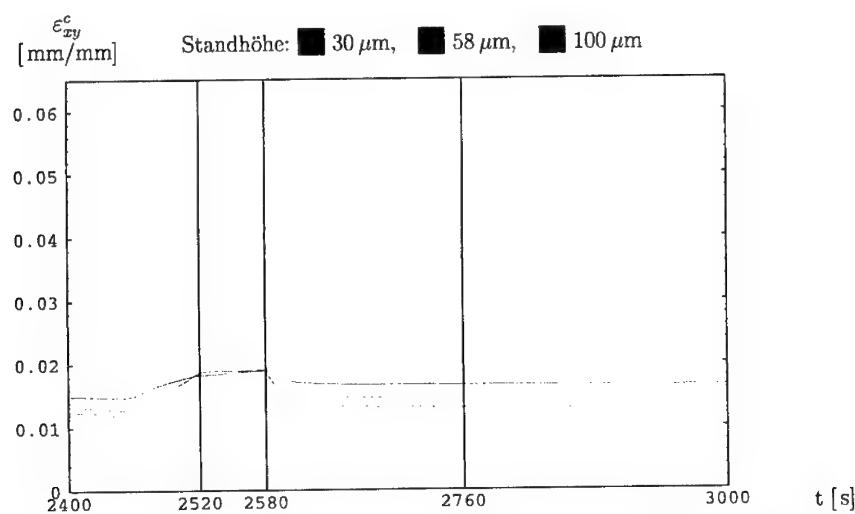


Abbildung 149: Transientenplot der Kriechgleitungen ε_{xy}^c in der Darstellungsebene am Knoten 503 über den fünften Temperaturzyklus

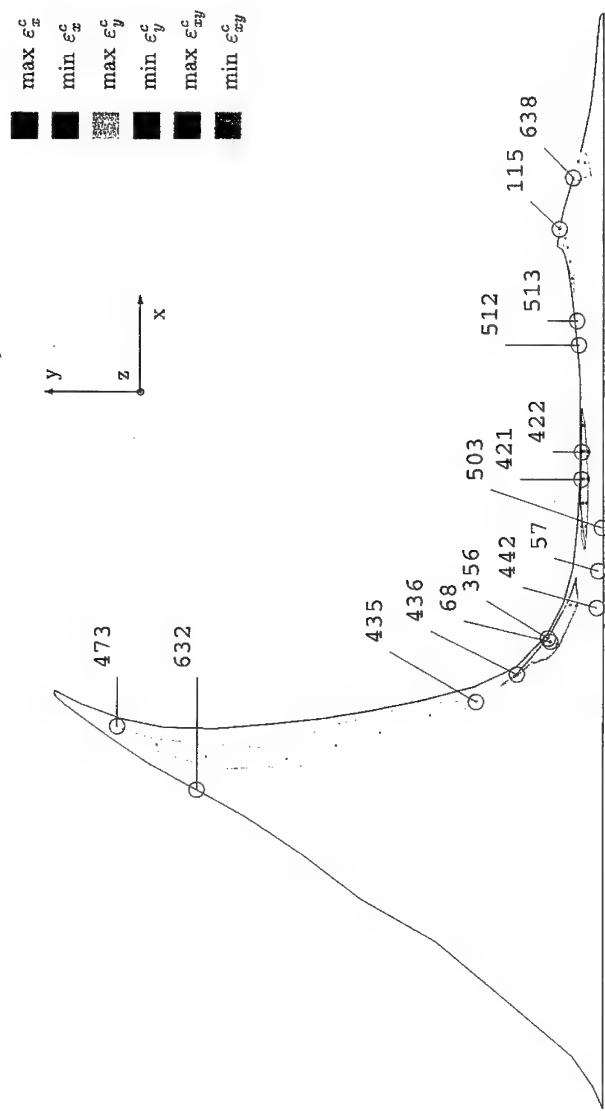


Abbildung 150: Lotbereiche mit extremen Kriechdehnungen und -gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $30 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

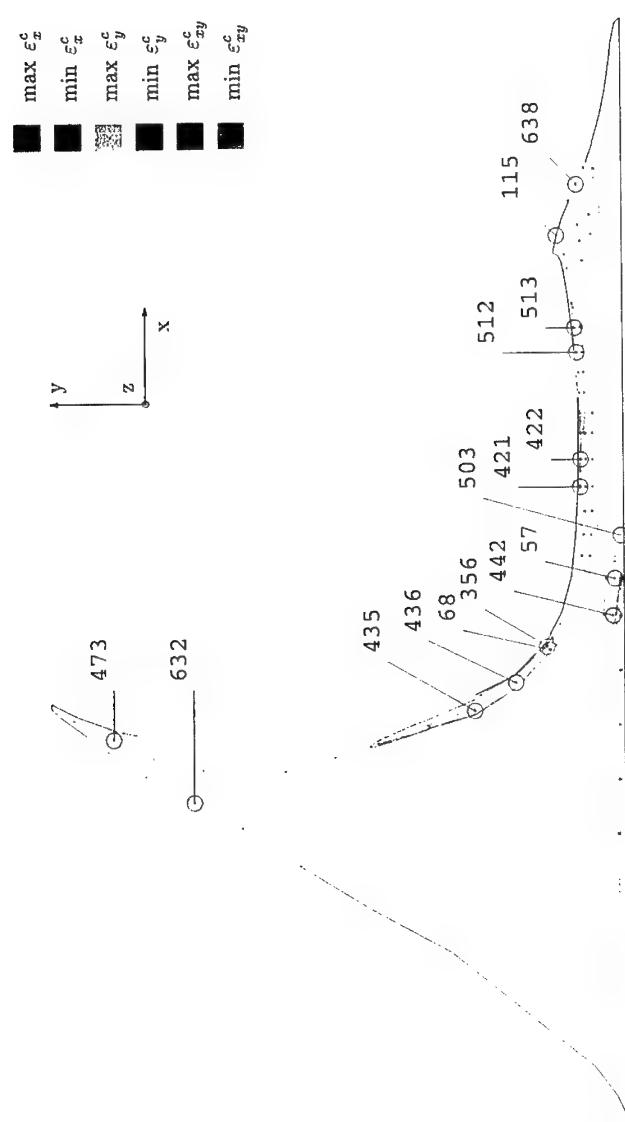


Abbildung 151: Lotbereiche mit extremen Kriechdehnungen und -gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $58\text{ }\mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

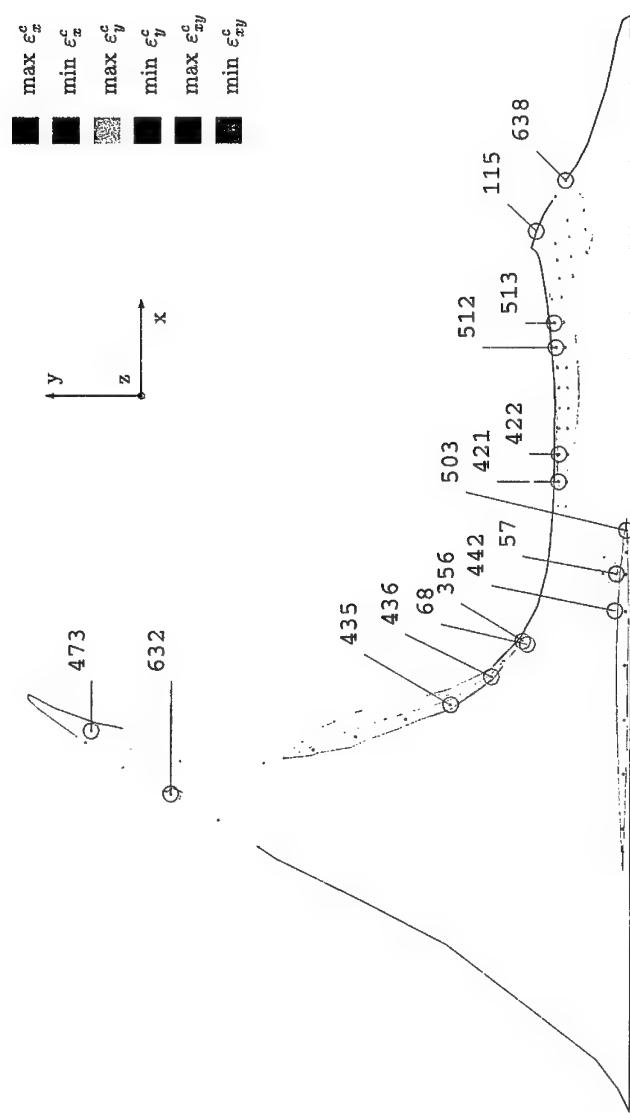


Abbildung 152: Lotbereiche mit extremen Kriechdehnungen und -gleitungen der Lötverbindung mit einer Standhöhe von $100 \mu\text{m}$ über alle Zeiten t mit $t \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

6.5.5 Zusammenfassung, Bewertung und Schlußfolgerungen

Zusammenfassend werden jetzt noch einmal die zuvor beschriebenen Finite-Element-Simulationsergebnisse benannt, die für die im nachfolgenden beschriebene *Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile* von besonderer Wichtigkeit sind. Diejenigen Parameter und geometrischen Bereiche, die intensiv untersucht werden müssen, bzw. jene, welche vernachlässigt werden können, werden nochmals hervorgehoben.

1. Die für die Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen oberflächenmontierter elektronischer Bauteile *näher zu untersuchenden geometrischen Bereiche* gehen aus den Detailbeschreibungen der Abschnitte 6.5.2, 6.5.3 und 6.5.4 hervor.

Die Bereiche größter Dehnungen und Gleitungen treten in der Nähe der Materialgrenze zur Nickel-Passivierungsschicht auf und lassen sich in drei kleinere Bereiche unterteilen:

- (a) Der Bereich unter dem Bauteil: Dieser Bereich erstreckt sich vom Knoten 421 bis zum Knoten 115. In diesem Bereich sind große horizontale und vertikale elastische Dehnungen, große horizontale plastische Dehnungen sowie große Kriechdehnungen in jeder Komponente vorzufinden.
- (b) Der Bereich vorne links unter und vor dem SMC: Dieser Bereich erstreckt sich von Knoten 356 über Knoten 436 bis zum Knoten 563. In diesem Bereich sind — hauptsächlich vor dem SMC — elastische Dehnungen in Richtung der Koordinatenachsen festzustellen. Es kommen plastische horizontale und Schubdehnungen im unteren Teil dieses Bereiches hinzu sowie horizontale und vertikale Kriechdehnungen, verteilt über den gesamten Bereich.
- (c) Der obere Bereich des Fillets: Dieser Bereich erstreckt sich in der Umgebung von Knoten 473. In diesem Bereich sind große elastische und Kriechgleitungen festzustellen.

Die Bereiche größter elastischer und plastischer Dehnungen erstrecken sich über die gesamte Breite zwischen Bauteil und kupferner Lötlandefläche.

Eine Sonderstellung nehmen die Kriechverformungen ein: Bei größerer Standhöhe bildet sich ein Bereich großer Schubverformungen im Lot an der Grenze zur Lötlandefläche aus. Dieser Bereich beginnt unter dem Bauteil in der Nähe von Knoten 57 und erstreckt sich über ein Drittel der Lötlandefläche bis hinunter unter das Fillet.

2. Ein wichtiger Parameter für die Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen oberflächenmontierter elektronischer Bauteile ist die *Standhöhe der Bauteile*. Die verschiedenen Dehnungskomponenten zeigen ausgeprägte Zusammenhänge zwischen ihrem Betrag und der Standhöhe des Bauteils:
 - (a) Die elastischen Schubgleitungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Standhöhe. Je nach Lotbereich gilt hauptsächlich: Die elastischen Schubgleitungen werden betragsmäßig größer bei kleiner werdender Standhöhe.
 - (b) Auch bei den plastischen Dehnungskomponenten ist eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Standhöhe festzustellen, jedoch liegt hier ein komplexerer Zusammenhang vor, bei dem der Ort der beobachteten plastischen Dehnung von wesentlicher Bedeutung ist.

- (c) Schließlich liegt auch bei den Kriechdehnungskomponenten ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen Standhöhe und Betrag der Komponenten vor. Die Kriechdehnungskomponenten werden stets größer mit geringer werdender Standhöhe.
3. In den weiter oben genannten Bereichen größter Dehnungen und Gleitungen (1.(a)–1.(c)) sind die Kriechdehnungsanteile durchschnittlich um den Faktor 10 größer als die korrespondierenden Dehnungskomponenten der elastischen und plastischen Dehnungsanteile.
- Das bedeutet, daß die *Kriechdehnungen* bei der Lebensdaueruntersuchung sowohl qualitativ als auch quantitativ besonders für sich berücksichtigt werden müssen.
- Die Kriechdehnungen stellen damit einen wesentlichen Parameter dar, der bei den Untersuchungen zur Lebensdauer miteinbezogen werden muß.
4. Auch bei der Simulation von Thermozyklen bringt bereits die grob vernetzte Lötverbindung Simulationsergebnisse hervor, die eine plausible Verteilung der Spannungs- und Dehnungsanteile zeigen. Die Werte unterscheiden sich auch hier jedoch noch deutlich von den Simulationsergebnissen zur mittleren Vernetzung. Erst die Simulationsergebnisse der mittleren und der feinen Vernetzung stimmen nahezu überein. Eine weitere Verfeinerung liefert, wie beim einfachen Temperaturanstieg, bei ungleich höherem Rechenaufwand nur eine marginale Verbesserung in den Simulationsergebnissen und ist deshalb nicht gerechtfertigt.
5. Unter den Aspekten der Minimierung der Rechenzeit und der Präzision der Simulationsergebnisse bringt die Verwendung linearer Viereckselemente ebenen Dehnungszustandes sowie die einiger linearer Dreieckselemente ebenen Dehnungszustandes an Stellen mechanisch geringer Belastung im Bereich des Lotes die besten Ergebnisse hervor wie bereits bei der Simulation des Temperaturanstiegs beschrieben.

Für die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene *Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile* stellt sich damit folgendes heraus:

Der näher zu untersuchende geometrische Bereich sollte aus einer Auswahl von Knoten bestehen, die sich alle in der Nähe der Materialgrenze zur Nickelpassivierungsschicht befinden. Daher wird für die Schätzung der Lebensdauer aus den auf den Abbildungen 76 – 78, 101 – 103 und 150 – 152 verzeichneten Knoten eine repräsentative Auswahl getroffen.

In diesem Sinne fällt die Wahl auf die 11 Knoten mit den Nummern: 473, 563, 435, 436, 356, 551, 503, 421, 422, 513 und 115, dargestellt auf der Abbildung 153. Für jeden der 11 ausgewählten Knoten treffen wenigstens zwei der oben genannten Kriterien zu.

Außerdem sind als Parameter für die Schätzung der Lebensdauer besonders die Kriechdehnung und die Standhöhe zu berücksichtigen.

Besonderer Erwähnung bedarf es auch noch einmal, daß es sich bei der in der vorliegenden Arbeit simulierten Lötverbindung um eine mit *realer* Geometrie handelt. Hierdurch und durch die Verwendung eines Temperaturprofils, das reale Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge abbildet, wurde ein vergleichsweise realitätsnahe Modell analysiert. Es dient jetzt als Basis für die folgende Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile.

Nicht relevant als Parameter für die Schätzung der Lebensdauer stellte sich bei diesen Simulationen hingegen der verwendete Elementtyp bei der Finite-Element-Vernetzung heraus.

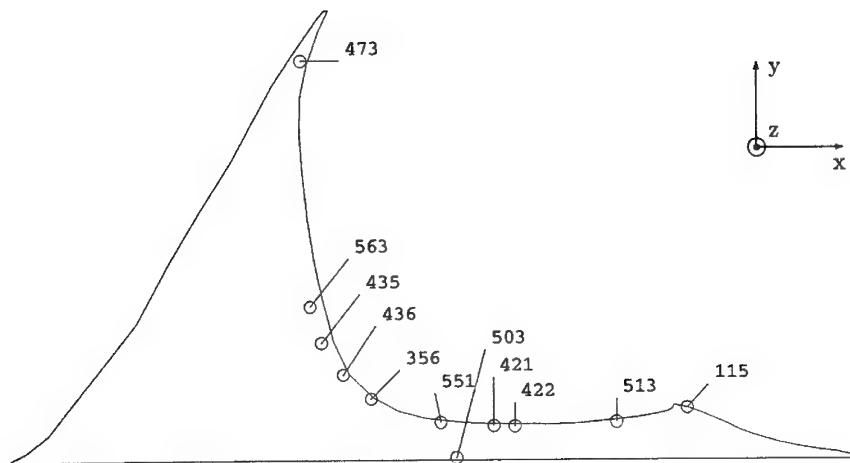


Abbildung 153: Die Lage der 11 kritischen für die Lebensdaueruntersuchung von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile ausgewählten Knoten

7 Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen elektronischer Bauteile

Mit der wachsenden Komplexität technischer Systeme und den damit verbundenen Problemen bei Betriebsausfällen sowie den steigenden Instandhaltungskosten und fehlendem spezialisiertem Bedienungs- und Instandhaltungspersonal wurden die Aspekte der Zuverlässigkeit und Sicherheit technischer Systeme in das Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt.

Von modernem Gerät erwartet man nicht nur, daß es zur Zeit $t = t_0$ fehlerfrei ist, sondern auch, daß es die geforderte Funktion ausfallfrei ausführen wird. Die Frage, ob ein Gerät über einen bestimmten Zeitabschnitt gemäß den Spezifikationen arbeiten wird, kann nicht einfach mit ja oder nein beantwortet werden. Wie die Erfahrung zeigt, kann lediglich die Wahrscheinlichkeit vorgegeben werden, mit der so eine Forderung zu erfüllen ist.

In dieser Arbeit werden nach einigen grundlegenden Begriffen aus der Zuverlässigkeitsanalyse zwei aus der Literatur [12, 39] bekannte Modelle zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen vorgestellt. Anschließend wird ein neues, hierauf und auf den Ergebnissen der vorangehenden Kapitel aufbauendes Modell zur präziseren Abschätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen entwickelt und erläutert.

7.1 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit einer Baugruppe, eines Bauteils oder einer Lötverbindung ist die Fähigkeit, den Anforderungen zu genügen, die durch den vorgesehenen Verwendungszweck bzw. durch die vorgesehene Funktion bestimmt und in einem Anforderungsprofil festgelegt werden.

Die Berechnung der Zuverlässigkeit erfordert die Festlegung eines Anforderungsprofils an die elektronischen Bauteile. Ein solches Anforderungsprofil beschreibt die Betriebs- und Umweltbedingungen, unter denen die zu untersuchenden Bauteile zuverlässig die vorgesehenen Funktionen erfüllen sollen.

Die Zuverlässigkeit ist ein von der Zeit abhängiges Qualitätsmerkmal. In Zuverlässigkeitsprüfungen elektronischer Bauteile werden ihre wichtigsten Parameter

- Lebensdauer,
- Ausfallrate und
- Ausfallwahrscheinlichkeit

ermittelt. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei dem Langzeitverhalten kritischer Parameter zuteil.

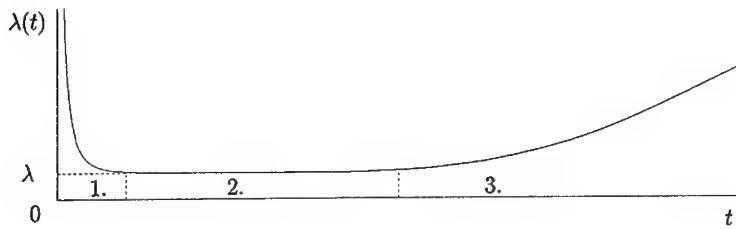


Abbildung 154: Typischer Verlauf der Ausfallrate einer Grundgesamtheit gleicher Betrachtungseinheiten (*Badewannenkurve*)

7.2 Ausfallrate

Die Festlegung der Funktion elektronischer Bauteile ermöglicht zugleich eine Definition ihres Ausfalls. Ein Ausfall eines Bauteils oder einer Lötverbindung ist dadurch gekennzeichnet, daß ein zu Beginn der betriebsmäßigen Beanspruchung als fehlerfrei angesehenes Bauteil bzw. angesehene Lötverbindung die festgelegte Funktion teilweise oder gar nicht mehr erfüllen kann. Der Ausfall kann auf verschiedene Arten eintreten und unterschiedliche Ursachen haben sowie auf verschiedenen Mechanismen beruhen.

Die Ausfallrate — das ist die Wahrscheinlichkeit $\lambda(t)$, daß ein Bauteil unter der Bedingung, daß es zur $t = 0$ neu war und im Intervall $(0, t]$ nicht ausfiel, im Einheitszeitintervall $(t, t + \delta t]$ ausfallen wird — ist einer der zentralen Parameter der Zuverlässigkeit [3, 4, 5] und spielt somit in Zuverlässigkeitsanalysen eine wichtige Rolle.

Trägt man die Ausfallrate $\lambda(t)$ über der Zeit auf, so läßt sich dieser Graph — auch als *Badewannenkurve* bekannt — in 3 Phasen unterteilen:

1. Phase der Frühausfälle: Die Ausfallrate $\lambda(t)$ nimmt rasch ab. Ausfälle in dieser Phase lassen sich in der Regel auf Materialschwächen, Qualitätsschwankungen in der Fertigung oder Anwendungsfehler (Dimensionierung, Handhabung, Prüfung, Bedienung usw.) zurückführen und werden gemeinhin als *Kinderkrankheiten* bezeichnet.
2. Phase der Ausfälle mit konstanter Ausfallrate: Die Ausfallrate $\lambda(t)$ ist näherungsweise konstant und gleich λ . In dieser Phase treten die Ausfälle meistens plötzlich und zufällig auf.
3. Phase der Verschleißausfälle: Die Ausfallrate $\lambda(t)$ steigt mit steigender Betriebszeit immer schneller an. Ausfälle in dieser Phase sind auf Alterung, Abnutzung, Ermüdung usw. zurückzuführen.

Herstellerangaben bezüglich der Ausfallrate stellen brauchbare Schätzungen dar. Laut Birolini [3, 4, 5] sind die angegebenen Schätzwerte jedoch häufig zu niedrig und differieren um den Faktor 2 bis 10 oder sind für andere als die erforderlich Umweltbedingungen ermittelt worden.

7.3 Ausfall von Lötverbindungen

Eine Lötverbindung ist ausgefallen, wenn sie die zugesicherte elektrische Funktion nicht mehr in vollem Umfang erfüllen kann. Der Ausfall einer Lötverbindungen kann bereits durch den Herstellungsprozeß determiniert sein:

- Fehlen des Lotes in der Lötverbindung
- Lötlandeflächen sind mit Lötstopplack überzogene
- Fehlplatzierung des Bauteils
- ‘kalte Lötverbindung²⁷
- Kurzschluß

Außerdem können im Laufe der Zeit weitere Fehlfunktionen auftreten:

- Die Lötverbindung kann ganz durchtrennt sein.
- Die Lötverbindung kann Haarrisse aufweisen (Wackelkontakt).

Für den Anwender machen sich alle diese Ausfallarten in teilweiser oder kompletter Fehlfunktion der Baugruppe und damit des Gerätes bemerkbar.

7.3.1 Ausfallmechanismen

Der Ausfallmechanismus ist der chemische und/ oder physikalische Vorgang, der zu einem Ausfall führt. [12] Ursachen sind:

1. Ausdehnungsunterschiede der verfügten Materialien unter Belastung durch stationäre Thermozyklen
2. Schubbelastung durch stationäre Thermozyklen
3. Ausdehnungsunterschiede der verfügten Materialien unter Belastung durch transiente Thermozyklen
4. Schubbelastung durch transiente Thermozyklen
5. Zyklisch transiente Spannungen
6. Rißwachstum
7. Legierungsbildung (Ausbildung intermetallischer Phasen)
8. Korrosion (in Dampf gelöste Verunreinigungen und Gase)

²⁷vgl. *kalte Lötverbindung* im Anhang

-
9. Elektrolyse
 10. Elektromigration²⁸
 11. Degradation durch von mechanischen Spannungen ausgelöste Diffusionmechanismen [35]

7.3.2 Ausfallursachen

Die im folgenden beschriebenen Ausfallursachen initiieren bzw. unterhalten nach Birolini [3, 4, 5] und Engelmaier [12] eine oder mehrere der unter 7.3.1 zusammengestellten Ausfallmechanismen.

- Thermozyklen, vielfach hervorgerufen durch Ein- und Ausschaltvorgänge sowie durch interne Leistungsschwankungen im Bauteil, führen zu den Ausfallmechanismen 1, 2, 3.
- Aufgrund ungleicher Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien kommt es zu mechanischen Spannungen, die die Ausfallmechanismen 1, 2, 3, 4 initiieren und unterhalten. Die gleichen Ausfallmechanismen werden durch niederfrequente Ermüdung ausgelöst.
- Externe Temperaturschwankungen durch Änderungen in der Versorgungsspannung, durch Ein- und Ausschaltvorgänge oder durch tageszeitlich und jahreszeitlich bedingte Temperaturschwankungen führen zu den Ausfallmechanismen 1, 2.
- Durch Thermoschocks ($> 50^\circ\text{C}/\text{Min}$) treten die Ausfallmechanismen 5, 4, 3 auf und die Ausfallmechanismen 1, 2 besonders häufig. Thermoschocks treten selten unter realen Einsatzbedingungen auf.
- Mechanische Beschädigungen haben den Ausfallmechanismus 5 zur Folge.
- Bei Biegebelastung des Substrates kommt es zu den Ausfallmechanismen 4, 5. Der Ausfallmechanismus 2 tritt ebenfalls auf.
- Mechanische Schockbelastung und Vibrationen führen zu den Ausfallmechanismen 4, 5.

7.3.3 Umweltbedingungen

Umweltbedingungen haben einen großen Einfluß auf die Funktionstüchtigkeit und auf die Lebensdauer von Lötverbindungen und elektronischen Bauteilen und somit auf Baugruppen und Geräte. Sie sind für viele übliche Anwendungen im Zivil- und Militärsktor in nationalen und internationalen Normen und Vorschriften festgelegt (z.B. DIN 40046, MIL-STD-202,-750,-810,-883, IEC 68 [10],[38],[25]). Solche Normen definieren neben den Beanspruchungen oft auch die Prüfbedingungen. Standardisiert sind in diesen Normen Einzelbelastungen wie:

²⁸vgl. *Elektromigration* im Anhang

Unterdruck, Wärme, Kälte, Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit, Pilzbefall, korrosive Atmosphäre, Regen, Staub, Sand, Lärm, Vibrationen, Schocks, Beschleunigung, Bestrahlung usw.

sowie verschiedene Kombinationen hiervon.

Die Umweltbelastungen sind nicht nur durch die Umweltbedingungen der Geräte und der Baugruppen vorgegeben, sondern werden teils von den elektronischen Komponenten selbst verursacht. So erhöht sich beim Betrieb die Innentemperatur des Geräts selbst bei forcierter Kühlung um +5 °C bis +15 °C und kann um bis zu +60 °C steigen, falls keine Kühlung vorhanden ist.

Umweltprüfungen dienen der Untersuchung des Bauteilverhaltens unter erschwerten Umweltbedingungen. Art und Umfang der Umweltprüfungen hängen von der vorgesehenen Anwendung ab.

In dieser Arbeit wird ausschließlich der Einfluß der Temperatur auf das mechanische Verhalten oberflächenmontierter elektronischer Bauteile näher untersucht.

7.4 Auswahlkriterien für elektronische Bauteile

Um eine hohe Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen und Geräten zu erreichen, ist es wichtig, bereits der Auswahl von Bauteilen und -stoffen große Bedeutung beizumessen [3, 4, 5]. Voraussetzung für eine solche Wahl sind genaue Kenntnisse über die vorgesehene Anwendung und die Eigenschaften des Bauteils bzw. Stoffes. Sie sollten für die vorgesehene Anwendung im Hinblick auf die geforderte Funktion, die zu erwartenden Umweltbedingungen und die geforderten Zuverlässigkeitsziele angemessen sein. Zudem sollte darauf geachtet werden, ob zeitraffende Prüfungen möglich sind und ob Resultate von Qualitätsprüfungen bereits vorliegen. Die Eigenschaften des Bauteils bzw. Stoffes wie Belastbarkeit und Langzeitverhalten der Leistungsparameter lassen sich aus der Gehäuseart und den Grenzdaten ableiten.

7.4.1 Gehäusetyp

Wichtig für die Zuverlässigkeit elektronischer Bauteile ist die Auswahl des Gehäuses. Abgesehen von der Gehäuseform (TO, DIL, FP, CC, PGA) und der Montageart (PTH oder SMT) gilt es, einen Gehäusetyp auszuwählen. Dabei wird grundsätzlich zwischen

- Kunststoff (plastic)
- Keramik-Sandwich (cerdip)
- Keramik (ceramic) und
- Metall (metal can)

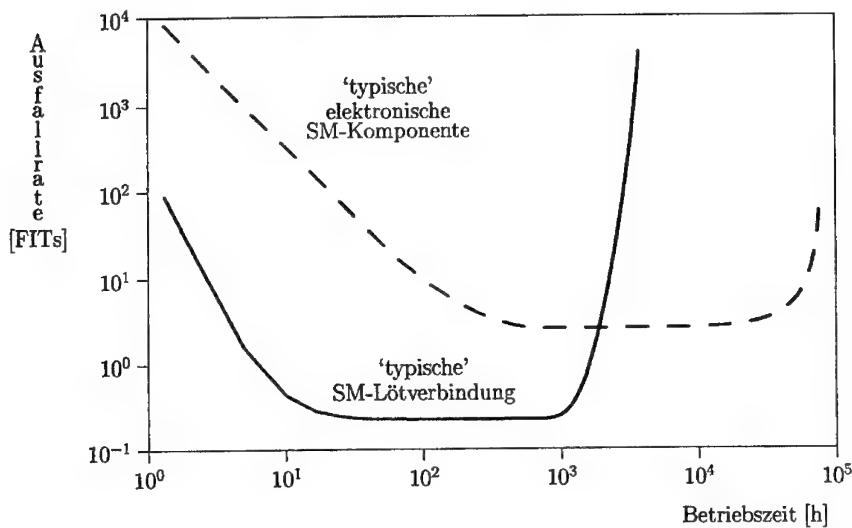


Abbildung 155: Verlauf der Ausfallrate ‘typischer’ elektronischer SM-Komponenten (gestrichelte Linie) sowie ‘typischer’ SM-Lötverbindungen (durchgezogene Linie)

unterschieden.

Jeder Gehäusetyp hat Vor- und Nachteile. Keramik-Sandwich, Keramik- und Metallgehäuse sind hermetisch (dicht). Sie bieten Vorteile in feuchter Umgebung. Zudem haben sie in der Regel kleinere thermische Widerstände als entsprechende Kunststoffgehäuse. Sie sind jedoch teuer und empfindlich. So können Mikrorisse durch mechanischer Stöße oder thermische Spannungen auftreten. Kunststoffgehäuse andererseits sind billig und robust, leider aber nicht hermetisch.

Der in dieser Arbeit näher untersuchte SMD, ein Keramik-Vielschichtkondensator, wird vorzugsweise eingesetzt, wenn hohe Stabilität, kleine Verluste und geringe Alterung gefordert werden. Er reagiert empfindlich auf Spannungsbelastung und Temperaturänderungen (bereits beim Löten).

7.5 Experimentell bestimmte Ausfallrate typischer SM-Komponenten und -Lötverbindungen

Das Ermüdungsverhalten der Lötverbindung ist abhängig von den beteiligten Materialien.

Durch experimentelle Reihenuntersuchungen [12] wurde festgestellt, daß bis zu einer mittleren Lebensdauer von etwa 10^3 Stunden die Ausfallrate einer Baugruppe durch die Ausfallrate der elektronischen SM-Komponenten bestimmt ist (vgl. Abbildung 155). Danach haben diese den Bereich konstanter Ausfallrate erreicht, während die Ausfallrate der SM-

Lötverbindungen bereits wieder zuzunehmen beginnt.

Diese Beobachtung unterstreicht noch einmal die Wichtigkeit präziser Lebensdauervorschägungen von Lötverbindungen. Die Abhängigkeit der Lebensdauer von Designvariablen, wie zum Beispiel der Standhöhe, ermöglicht dann bereits in der Entwicklungsphase, entsprechende Standhöhen für die angestrebte Nutzungsdauer zu berechnen.

7.6 Berechnung der Ausfallrate von SM-Komponenten und -Lötverbindungen

Es gibt im wesentlichen 3 Möglichkeiten, die Ausfallraten von SM-Komponenten und -Lötverbindungen zu berechnen:

1. Die Auswertung von Experimenten zur Bestimmung der Lebensdauer 'neuer' Bauelemente und Mikroverbindungstechniken.
2. Die mathematische Modellierung der in 1 genannten Experimente.
3. Die Finite-Elemente-Simulation der unter 1 genannten Experimente. Zusätzlich werden hierfür Materialdaten wie E-Modul, plastisches Materialverhalten und Kriechverhalten benötigt, die gegebenenfalls in weiteren Experimenten zu bestimmen sind.

Bei der Simulation kann — wie in dieser Arbeit dargelegt — die Geometrie variiert werden, um so auf der Grundlage der Experimente und Modelle Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer der untersuchten Lötverbindungen zu erhalten.

Die Finite-Elemente-Simulation gibt Aufschluß über die mechanischen Spannungs- und Dehnungsverteilungen in den simulierten Lötverbindungen, wenn sie bestimmten Umweltbedingungen — hier der zyklischen Variation der Temperatur — ausgesetzt sind. Um aus diesen Simulationsergebnissen eine Schätzung der Lebensdauer der betrachteten Lötverbindungen abzuleiten, sind Modelle nötig, die die Entwicklung der durch die Simulation erhaltenen mechanischen Größen mit der Lebensdauer der simulierten Lötverbindungen verknüpfen.

7.7 Modelle zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen oberflächenmontierter Lötverbindungen

Es gibt unterschiedliche Ansätze und Modelle, um eine Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen bei oberflächenmontierten Bauteilen durchzuführen, zu beschreiben und zu simulieren ([33, 65]). In dieser Arbeit werden zwei in der Literatur bekannte Modelle zur Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen bei oberflächenmontierten Bauteilen vorgestellt: Das *Coffin-Manson-Modell nach Engelmaier* und das *Coffin-Manson-Modell nach Morrow*.

7.7.1 Coffin-Manson-Modell nach Engelmaier

Das zugrundeliegende *Coffin-Manson-Modell* wurde ursprünglich entwickelt, um die aus Experimenten gewonnenen Daten aus niederfrequenten Ermüdungsanalysen, dargestellt in einem doppeltlogarithmischen Diagramm, analytisch zu beschreiben. In diesem Diagramm wurde der Logarithmus der Dehnungsspannweite über dem Logarithmus der Anzahl der Thermozyklen bis zum Ausfall dargestellt. Die Ermüdungsdaten von Werkstoffen wie Aluminium, Stahl und Nickel konnten auf diese Weise gut analytisch beschrieben werden.

Engelmaier beschreibt in [12] ein einfaches, hierauf basierendes Ermüdungs-Lebensdauer Modell für Lot mit parametrischer Anpassung für die Temperatur und für die Verweilzeit bei hoher Temperatur.

Bei diesem Modell wird die Ermüdungs-Lebensdauer aus der zyklischen Scherdehnungs-Amplitude des Lotes bestimmt:

$$\bar{N}_f = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon_f'} \right)^{1/c} . \quad (12)$$

In Gl. (12) werden folgende Bezeichnungen verwendet:

$2 \cdot \bar{N}_f$ mittlere Anzahl der Thermozyklen bis zum Ausfall der Probe

$\Delta\gamma/2$ zyklische Scherdehnungsamplitude

$2 \cdot \varepsilon_f' \approx 0.65$, Ermüdungszähigkeitskoeffizient

$$c = -0.442 - 6 \cdot 10^{-4} \bar{T}_s + 1.74 \cdot 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{360}{t_D} \right) \text{ Ermüdungszähigkeitsexponent.}$$

Speziell für Lot sind hier die folgenden Werte einzusetzen:

\bar{T}_s [°C] mittlere Temperatur des Lotes während der Thermozyklen

t_D [Minuten] mittlere Verweilzeit bei hoher bzw. bei niedriger Temperatur je Thermozyklus.

7.7.2 Coffin-Manson-Modell nach Morrow

Es stellt eine Verfeinerung des *Coffin-Manson-Modells* dar, und wurde von Morrow [39] mathematisch modelliert.

Beim Coffin-Manson-Modell nach Morrow wird die Lebensdauer nicht allein durch die plastische Dehnungsspannweite — ähnlich wie in Gl. (12) — beschrieben, sondern es gehen neben den elastischen ($\Delta\varepsilon_e$) die nichtelastischen ($\Delta\varepsilon_p$) Dehnungsanteile in die implizite Gleichung zur Schätzung der Ermüdungslebensdauer ($2 \cdot N_f$) ein. Das Coffin-Manson-Modell nach Morrow ist in Abbildung 156 graphisch dargestellt und kann mathematisch wie folgt beschrieben werden:

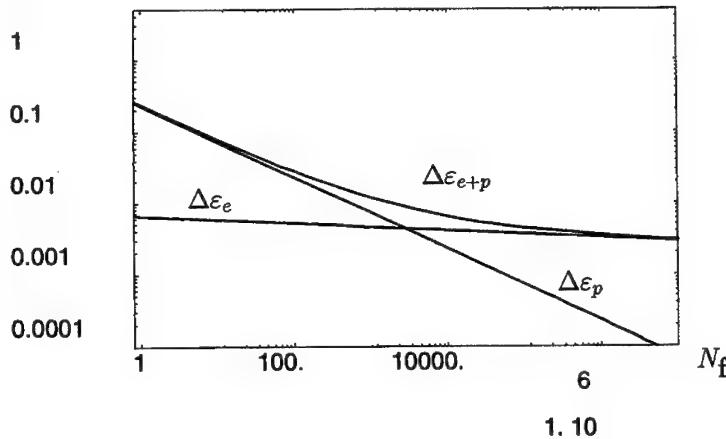
$\Delta\varepsilon$ 

Abbildung 156: Schematische Darstellung der elastischen ($\Delta\varepsilon_e$), der plastischen ($\Delta\varepsilon_p$) und der totalen Dehnungsamplitude ($\Delta\varepsilon_{e+p}$) über der Anzahl der Lastumkehrzyklen N_f

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c . \quad (13)$$

Dabei lässt sich der Parameter b als die Steigung der elastischen Kurve ($\Delta\varepsilon_e$) auf der Abb. (156) an der Stelle $N_f = 1$ und c als die Steigung der Amplitude der plastischen Kurve ($\Delta\varepsilon_p$) im Sinne der Gleichungen Gl. (14) und Gl. (15) interpretieren:

$$b = \left. \frac{\partial}{\partial N_f} \left(\log \left(\frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \right) \right) \right|_{N_f=1} \quad (14)$$

$$c = \left. \frac{\partial}{\partial N_f} \left(\log \left(\varepsilon'_f (2N_f)^c \right) \right) \right|_{N_f=1} . \quad (15)$$

Die entsprechenden Materialkonstanten für Lot können der Literatur, z.B. Bivens [6], entnommen werden:

$$\begin{aligned} \sigma'_f &= 7350 \text{ psi}/E & b &= -0,05 \\ \varepsilon'_f &= 0,325 & c &= -0,5 \end{aligned} \quad (16)$$

7.7.3 Lebensdauerabschätzung von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauteile

Die Simulationsrechnungen liefern neben den Werten für die Komponenten der Dehnungsanteile auch die der zyklischen Scherdehnungsamplituden und totalen Vergleichsdehnungen an den betrachteten Knoten. Diese Werte an den elf ausgewählten, kritischen Knoten (vgl. Abbildung 153) aus dem Bereich der Lötverbindung werden nun genutzt, um eine Abschätzung der Lebensdauer der Lötverbindung zu gewinnen. Dazu werden die Finite-Element-Simulationsergebnisse in die Coffin-Manson-Modelle nach Engelmaier Gl. (12) (vgl. Abschnitt 7.7.1) respektive nach Morrow Gl. (13) (vgl. Abschnitt 7.7.2) eingesetzt.

Für die in den vorangegangenen Simulationen gewonnenen Dehnungen erhält man so als Ergebnis eine Schätzung der Anzahl der Thermozyklen (N_f), nach denen die Lötverbindung ausfällt.

Natürlich variieren diese Werte in Abhängigkeit von dem Knoten, an dem die Auswertung vorgenommen wurde und in Abhängigkeit der jeweiligen Standhöhe. Eine Bewertung der prognostizierten Lebensdauer an einer Anzahl von Knoten liefert dann eine Schätzung für die Lebensdauer.

Zu berücksichtigen ist, daß die zugrundeliegende Simulation thermischer Zyklen zeitraffende Tests modelliert. Was bedeutet das?

Die Tests heißen zeitraffend, weil in diesen Tests die Umgebungsrandbedingungen gegenüber den normalerweise anzutreffenden verschärft sind und so eine schnellere Alterung hervorgerufen wird: So sind die Thermozyklen in diesen Tests in aller Regel kürzer oder gar deutlich kürzer als unter normalen Einsatzbedingungen. Sie sind jedoch lang genug, so daß die mechanischen Effekte beobachtet werden können, die auch unter normalen Einsatzbedingungen beobachtet werden. Unter diesen extremen Bedingungen wird die Lebensdauer z.T. drastisch verkürzt.

Des weiteren werden i.d.R. unter normalen Einsatzbedingungen nicht bei jedem Thermozyklus die thermischen Randwerte erreicht; die thermischen Randwerte werden unter realen Einsatzbedingungen viel näher beieinander liegen. Der einzelne Thermozyklus wird also i.d.R. nicht über 100° sondern über einen kleineren Temperaturbereich wie etwa $30^\circ \dots 50^\circ$ gehen, wobei die Lötverbindung über viele Thermozyklen hinweg sicherlich alle genannten Temperaturen annehmen kann.

Kennt man nun die Relation zwischen normaler Lebensdauer und Lebensdauer unter den verschärften Randbedingungen des zeitraffenden Tests, so läßt sich aus der im zeitraffenden Test recht schnell erhaltenen Lebensdauer die wahre Lebensdauer prognostizieren.

7.7.3.1 Lebensdauerabschätzung nach dem Coffin-Manson-Modell nach Engelmaier Setzt man die aus der Finite-Element-Analyse gewonnenen Daten in das Coffin-Manson-Modell nach Engelmaier, also in die Gleichung Gl. (12) ein, so erhält man für die prognostizierte Lebensdauer Werte zwischen 165000 und $2 \cdot 10^6$ Thermozyklen je nach Knoten bis zum Ausfall. Auch [37] errechnet ähnlich hohe Werte basierend auf seinen FE-Simulationen unter Verwendung des Coffin-Manson-Modells nach Engelmaier.

Gemessen an experimentell ermittelter Lebensdauer liegen die erhaltenen Werte für Lotmaterial zu hoch [13]. Diese Werte kommen eher bei härteren Materialien vor und erinnern

daran, daß dieses Modell 7.7.1 ursprünglich von Coffin und Manson für die Schätzung der Lebensdauer von Werkstoffen wie Aluminium, Stahl und Nickel entworfen wurde. Dennoch legen viele Autoren bei der Untersuchung der Lebensdauer von Lötverbindungen dieses Modell zugrunde, da es eine niederfrequente thermische Ermüdung beschreibt. Außerdem besteht bei diesem Modell eine deutliche Korrelation zwischen der Standhöhe und der prognostizierten Lebensdauer: Je größer die Standhöhe ist, desto größer wird die erwartete Lebensdauer geschätzt.

7.7.3.2 Lebensdauerabschätzung nach dem Coffin-Manson-Modell nach Morrow Setzt man die aus der Finite-Element-Analyse gewonnenen Daten hingegen in das Coffin-Manson-Modell nach Morrow mit den Materialdaten nach Bivens[6], also in die Gleichung Gl. (13) ein, so erhält man für die prognostizierte Lebensdauer Werte zwischen 12 und 137 Thermozyklen je nach Knoten bis zum Ausfall.

8 Diskussion

Wie lange hält die Lötverbindung?

Die prognostizierte Lebensdauer beträgt nach dem Coffin-Manson Modell nach Engelmaier zwischen 165000 und $2 \cdot 10^6$ Thermozyklen je nach Standhöhe und geometrischen Ort bis zum Ausfall. Für das Coffin-Manson-Modell nach Morrow ergeben sich prognostizierte Lebensdauern zwischen 12 und 137 Thermozyklen je nach Standhöhe und geometrischen Ort bis zum Ausfall.

Die Werte divergieren zu stark für eine endgültige Beantwortung der Frage nach der Lebensdauer einer Lötverbindung. Zudem liegen nach Experimenten [13] die für das erste Modell prognostizierten Lebensdauerschätzungen zu hoch und die für das zweite Modell zu niedrig. Die Ursache für die stark divergierenden Lebensdauerprognosen ist in den zur Verfügung stehenden Werkstoffgesetzen und den verfügbaren Materialkonstanten zu suchen.

Es müssen also in Zukunft genauere Modelle, z.B. mit Hilfe der Schädigungsmechanik, entwickelt werden, die mehr Parameter, wie z.B. Degradation, Haltezeiten, Temperaturwechsel für Mikrostruktur usw. besser berücksichtigen. Zudem sollten Nachteile eines Modells vom Coffin-Manson Typ vermieden werden, zu denen insbesondere die Annahme einer linearen Schadensakkumulation zählt. Die lineare Schadensakkumulation ist zwar rechnerisch einfacher zu handhaben, jedoch ist aus Experimenten ersichtlich, daß diese oft mit unrealistisch hohen Sicherheitsfaktoren angewandt wird[15].

Wie hängen die Lotmaterialdaten von der Spannung (E-Modul), der Zeit (Kriechen) und von der Temperatur ab?

Die Materialdaten des untersuchten ternären Zinn-Blei-Silber Weichlotes Sn62Pb36Ag2 hängen wesentlich von der Temperatur ab. So variiert der E-Modul zwischen 17,5 GPa bei einer Temperatur von -20 °C und 9,9 GPa bei einer Temperatur von +80 °C. Diese von uns gemessenen Werte bewegen sich im unteren Bereich der in der Literatur [14, 18, 26, 34, 40, 19] für Weichlot angegebenen Werte. Dort findet man Werte zwischen 12 und 50 GPa.

Die Zugfestigkeit R_m variiert noch stärker mit der Temperatur. Sie beträgt 63,8 MPa bei einer Temperatur von -20 °C und 29,2 MPa bei einer Temperatur von +80 °C.

Bei den Kriechkennwerten wurde sowohl eine starke Abhängigkeit von der Temperatur als auch von der Spannung festgestellt (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Die große Variation der Materialkennwerte des untersuchten ternären Weichlotes sind aus metallurgischer Sicht nicht weiter spektakulär, da sie bei Materialien, die in einem großen homologen Temperaturbereich betrieben werden, sogar erwartet werden dürfen.

Welche Geometrie und welche Randbedingungen sollten für die Lötverbindung gewählt werden, um möglichst realistische Ergebnisse erwarten zu lassen?

Um realitätsnahe Simulationsbedingungen zu haben und um in der Simulationsrechnung die Anzahl der geometrisch bedingten Spannungssingularitäten zu minimieren, wird als Modellgeometrie die Kontur einer realen Lötverbindung verwendet (vgl. Abbildung 6).

Dieses Vorgehen führt zur Benutzung "weicherer" Konturen bei der Lötverbindung, als es der Fall bei den meistens vorgenommenen modellhaften Vereinfachungen ist. Bei den üblichen modellhaften Vereinfachungen — Vereinfachungen im Sinne einfacherer geometrischer Beschreibbarkeit — werden die Begrenzungen des Lotmaterials als linear angenommen. Eine Gerade beschreibt sich schließlich am einfachsten. Doch gerade dadurch kommt es an den Orten, an denen zwei Geradenstücke verbunden sind, zu den geometrischen Singularitäten, die dann bei der Finite-Element-Simulation zu den unerwünschten und geometrisch bedingten mechanischen Spannungsüberhöhungen führen.

Um den Rechenaufwand jedoch nicht unnötig durch die der realen Lötverbindung nachempfundenen Kontur in die Höhe zu treiben, wurde zur Reduktion des Rechenaufwandes davon ausgegangen, daß die beiden Lötverbindungen des SMC symmetrisch modelliert werden können. Die hierbei entstehenden Simulationsfehler werden als vernachlässigbar gegenüber der wesentlichen Verkürzung der Rechenzeit angesehen, die hierdurch erreicht wird. Dieses Vorgehen entspricht dem üblichen [32, 31, 34, 28, 40].

Was muß bei der Vernetzung der Lötverbindung für die Finite-Element-Analyse beachtet werden?

Um diese Frage beantworten zu können, wurde zunächst ein Temperaturanstieg (vgl. Kapitel 5) simuliert, um mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen mehrere komplett Thermozyklen zu simulieren.

Ein wichtiges Ergebnis der Simulation des Temperaturanstiegs ist es, daß SMC und PCB relativ grob vernetzt werden können, was sich auch im Hinblick auf die Simulation von Thermozyklen bestätigt hat. Ebenso können große Teile des Lotbereiches relativ grob vernetzt werden. Ausnahmen sind auf jeden Fall die erkannten kritischen Bereiche, die sich in der Nähe der Materialgrenzen hin zum Cu-Lötpad und hin zur Ni-Passivierungsschicht erstrecken. Diese müssen besonders fein, der Bereich unmittelbar unter dem SMC muß sogar noch feiner vernetzt werden, insbesondere in der Nähe der Materialgrenzen zum Ni bzw. zum Cu-Bereich. Das ist wichtig, um die Krieffekte genau simulieren zu können, denn in diesen Bereichen sind die Auswirkungen der materialbedingten unterschiedlichen Temperatursausdehnungskoeffizienten von SMC, Lot und Leiterplatte besonders groß. (vgl. Abschnitte 5.5.6 und 6.5.5)

Welche Aspekte sollten mit der Finiten-Elemente-Analyse untersucht werden?

Es sollte das niederfrequente Ermüdungsverhalten einer Lötverbindung unter zyklischer thermischer Belastung untersucht werden.

Dazu wurden die verschiedenen mechanischen Dehnungskomponenten näher untersucht.

Die totale Dehnung wurde daraufhin in ihre Komponenten, die

- thermischen Dehnungen,
- Kriechdehnungen,
- elastischen Dehnungen und
- plastischen Dehnungen

unterteilt.

Dabei wurde festgestellt, daß die Kriechdehnungsanteile alle anderen Dehnungsanteile durchschnittlich um den Faktor 10 überschreiten. Die Dehnungsamplitude und ihre Komponenten konnten nur deswegen so präzise ermittelt werden, weil auch die verhältnismäßig kleinen Beträge, insbesondere die der plastischen Dehnung, durch die Simulationsrechnung genau bekannt waren.

Außerdem stellte sich heraus, daß die Kriechdehnungsanteile nur unter Verwendung eines geeigneten Temperaturprofiles so zu simulieren sind, daß die in der Realität vorkommenden Materialbelastungen hinreichend genau modelliert werden können. Dazu wurden mehrere Ein- und Ausschaltvorgänge simuliert. Da in der Praxis Baugruppen in der Regel nicht ständig nur ein- und ausgeschaltet werden, sondern nach dem Einschalten eine gewisse Zeit in Betrieb bleiben, bzw. nach dem Ausschalten eine gewisse Zeit ausgeschaltet bleiben, wurden auch für diese Zeitschnitte entsprechende Simulationsintervalle vorgesehen. Dabei ist deutlich geworden, daß insbesondere die Dauer der Betriebszeit nicht zu kurz gewählt werden darf, da sonst die Kriechdehnungsanteile nicht realistisch in der Simulation abgebildet werden.

Wie ist das Temperaturprofil zu wählen, um Thermozyklen möglichst realistisch in einer niederfrequenten Ermüdungsanalyse nachzubilden?

Ebenso wurde der Frage nachgegangen, wie die thermischen Randbedingungen formuliert werden müssen, um die Dehnungskomponenten ihrer in der Praxis zukommenden Bedeutung gemäß simulieren zu können. Um realistisch niederfrequente Ermüdungsvorgänge zu simulieren, wurde ein Temperaturprofil gewählt, daß die vier wesentlichen Abschnitte bei einem solchen Vorgang berücksichtigt und modelliert. Die vier Abschnitte sind: Erwärmung von niedriger auf hohe (Betriebs-)Temperatur, Halten auf hoher (Betriebs-) Temperatur, Abkühlung auf niedrige (Ruhezustands-) Temperatur und Halten bei niedriger (Ruhezustands-) Temperatur. Die beiden Abschnitte Erwärmung und Abkühlung wurden realitätsnah mit sich exponentiell ändernder Temperatur über die Zeit modelliert. D.h. der Erwärmungsvorgang wurde mit zunächst schneller und dann immer langsamer werdendem Temperaturanstieg modelliert. Ebenso wurde der Abkühlungsvorgang zunächst schneller und dann langsamer abkühlend modelliert (vgl. Abschnitt 6).

Im Gegensatz dazu wird in der Literatur bei Simulationsrechnungen in der Regel ein rechteck-[33, 29, 30, 34] oder ein trapezförmiges [43, 47] Temperaturprofil zugrundegelegt. Der wesentliche Nachteil besteht darin, daß die Simulation von Temperatursprüngen zu rechnerischen Spannungsüberhöhungen führt, die durch ein langsam ansteigendes Temperaturprofil nicht hervorgerufen werden. Von daher ist es sinnvoller, mit einem trapezförmigen Temperaturprofil zu rechnen als mit einem rechteckigen.

Jedoch werden die realen Abläufe nur ungenügend abgebildet. Insbesondere werden dadurch die plastischen Vorgänge und die des Kriechens verfälscht. Bei beiden ist das Modellieren des richtigen Temperaturprofils essentiell. Denn bei niedrigeren Temperaturen ist das Lotmaterial relativ hart und kriecht wenig. Bei ansteigender Temperatur werden die Kriecheffekte dominanter, und ein gutes Simulationsergebnis ist nur zu erzielen, wenn der hierdurch bedingte Spannungsabbau über ein den realen Verhältnissen angepaßtes Temperaturprofil simuliert wird — wenn also der Temperaturgradient mit zunehmender Temperatur abnimmt.

Eine wesentliche Verbesserung dieses Simulationsparameters wäre nur durch Simulation einer Thermoquelle im SMC zu erreichen. Davon wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch abgesehen, da sonst die Simulationszeiten viel zu sehr ansteigen würden. Wenn jedoch in naher Zukunft genügend Rechenpower zur Verfügung stehen wird, wäre es wünschenswert, eine Thermoquelle im SMC zu modellieren. Dadurch würde ein Temperaturprofil simuliert werden können, das die reale Temperaturdistribution in einer Lötverbindung noch besser nachbildet. Möglicherweise werden hierdurch zur Zeit als kritisch eingestufte Bereiche im Lotmaterial an Bedeutung verlieren, andere wiederum werden sich als kritischer als bisher angenommen erweisen. Die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse könnten zu einer weiteren Verbesserung der Lebensdauermodelle und damit zu einer weiteren Verbesserung der Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen führen.

Wo sind die kritischen geometrischen Orte innerhalb der Lötverbindung?

Die Simulationsrechnung hat ergeben, daß sich die kritischen Orte innerhalb des Lotmaterials hauptsächlich in der Nähe der Materialgrenze zur Ni-Passivierungsschicht befinden. Sie befinden sich besonders im Lotpalt unterhalb des SMC und hier dann auch in der Nähe zum Cu-Lötpad in der Umgebung der Knoten 551, 421, 422 und 503 (vgl. Abbildung 153 und im Detail auf den Abbildungen 76 – 78, 101 – 103 und 150 – 152).

Daß die kritischen Orte innerhalb des Lotmaterials in der Nähe der Materialgrenze zur Ni-Passivierungsschicht zu finden sind, mehr noch als in der Nähe der Materialgrenze zur Cu-Lötlandefläche, liegt daran, daß der Mismatch in den Temperaturausdehnungskoeffizienten an dieser Materialgrenze mehr als doppelt so groß ist wie in der Nähe der anderen. Die Temperaturausdehnungskoeffizienten unterscheiden sich an der Materialgrenze Lot-Cu um einen Faktor von 4,5 und an der Materialgrenze Lot-Ni etwa um 11,5.

9 Zusammenfassung

Aus Experimenten wurden Materialdaten für das ternäre Lot Sn62Pb36Ag2 gewonnen.

Diese Daten wurden für die Beschreibung des Materialverhaltens von Lot Sn62Pb36Ag2 hinsichtlich der elastischen und plastischen Vorgänge sowie des Kriechens bei der Finite-Element-Analyse verwendet.

Die Finite-Element-Analyse ergab die Bedeutung der unterschiedlichen Dehnungsanteile bei unterschiedlichen Temperaturen und zu verschiedenen Zeiten:

- Die elastischen Dehnungen sind bei geringer Temperatur und kurzer Erwärmungszeit dominant.
- Die plastischen Dehnungen treten bei mittlerer Temperatur und mittlerer Erwärmungszeit in den Vordergrund.
- Entscheidend ist die Bedeutung der Kriechdehnung bei hoher Temperatur und mittlerer bis langer Erwärmungszeit. Ihre Auswirkung nimmt mit der Zeit zu.

Hieraus läßt sich ableiten, daß Kriechdehnungen für die Ermüdung von Lötstellen oberflächenmontierter Bauteile einen wesentlich größeren Einfluß haben als bisher angenommen.

Die vorgestellten FE-Ergebnisse zeigen nun deutlich, daß es bei Lebensdaueruntersuchungen mit beschleunigenden Testverfahren neben der richtigen Auswahl der Temperaturhöhe vor allem darauf ankommt, die Haltezeit bei den Einsatztemperaturen nicht zu kurz zu wählen.

Wird die Haltezeit zu kurz gewählt, dann kann das Ausmaß der Kriecheffekte nur unzureichend bzw. gar nicht abgeschätzt werden. Außerdem hat die Finite-Element-Analyse ergeben, daß die Standhöhe ein weiterer wesentlicher Parameter für die Schätzung der Lebensdauer von Lötverbindungen ist.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren einer Finite-Element-Simulation und einer daran anschließenden detaillierten Analyse der Vergleichsdehnungen und ihrer Komponenten ermöglicht es, die für die Ermüdungsschädigung kritischen geometrischen Orte in einer Lötverbindung zu lokalisieren. Mit einer sich hieran anschließenden Eichung der Simulationsergebnisse durch entsprechende geeignete Experimente an Lötverbindungen können Lebensdauerschätzungen für Lötverbindungen angegeben werden, die die unterschiedlichen nicht-elastischen Dehnungskomponenten sehr viel präziser berücksichtigen. Um zu realistischen Lebensdauerabschätzungen zu kommen, wären aber genauere Schädigungsmodelle erforderlich.

10 Ausblick

Eine Strategie für die Verbesserung von Modellen ist die Einführung von Modellen mit mehr Parametern. Eine weitere Strategie liegt in der Verbreiterung und Präzisierung der Kenntnisse über das Verhalten der verwendeten Materialien. Eine dritte Strategie liegt darin, in den Simulationen die Vereinfachungen durch adäquاتere Beschreibungen der Realität zu modellieren.

So könnte die Berücksichtigung der Mikrostruktur in der kontinuumsmechanischen Materialbeschreibung nach Kachanov[15, 7] eine Modellverbesserung bewirken. Dieser Ansatz birgt nach Fischer [15] folgende Vorteile:

- Unmittelbare Berücksichtigung des Schädigungseinflusses auf die aktuellen Dehnungen und Spannungen in einer Konstruktion.
- Erfassen der Schädigung bis zum Entstehen von Makrorissen (bisher "Grauzone") und damit physikalisch "relevante" und vereinfachte Berechnung des Rißfortschrittes.
- Berücksichtigung der Poren- bzw. Rißschließung bei Druckhauptspannungen.
- Anpassen der Schädigungsfunktion an die Schädigungsmechanismen durch Experimente (Parameterfestlegung durch "einfache" Versuche).
- Berücksichtigung mehrerer simultaner Schädigungsmechanismen.
- Direkte Anwendbarkeit auf einen dreidimensionalen Beanspruchungszustand.
- Direkte Anwendbarkeit auf einen beliebigen Zeitbeanspruchungsverlauf.
- Qualitativ richtige Wiedergabe der nichtlinearen Schadensakkumulation.

Eine Verbreiterung der experimentellen Basis könnte durch die Bestimmung der Kriech-Bruchgrenzkurve und damit der Materialkonstanten C_e und c erreicht werden.

Die Bestimmung von Materialkennwerten in Abhängigkeit von zyklischer thermischer Last läßt weitere Erkenntnisse erwarten. So haben beispielsweise Manson [36] und Avery [2] festgestellt, daß manche Materialien in einigen Temperaturbereichen unter zyklischer thermischer Last erheblich andere Materialkennwerte aufweisen, als unter konstanter thermischer Last.

Eine weitere, wesentliche Verbesserung der Simulation wäre durch die Simulation einer Thermoquelle im SMC zu erwarten. Zudem wird in Zukunft mehr Rechenpower zur Verfügung stehen, so daß mit immer komplexeren Modellen immer bessere Ergebnisse in kürzerer Zeit erzielt werden können.

11 Anhang

Bruchzähigkeit Bezeichnung für die Stärke des Widerstandes, den ein Körper der Trennung der Bindungen zwischen seinen atomaren Bausteinen entgegensetzt

Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, Verhältnis der Längenänderung Δl zur Ausgangslänge l

Dehnung, anelastische Dehnung, die von der durch z.B. das Hookesche Gesetz beschriebenen elastischen Dehnung verschieden ist

Dehnung, elastische Dehnung, die reversibel ist

Dehnung, logarithmische Die logarithmische Dehnung ist die logarithmierte Dehnung.

Dehnungsverfestigung Veränderung der Werkstoffeigenschaften bei plastischer Verformung oder Wärmebelastung, die sich vor allem in einer Erhöhung der Fließgrenze äußert

eutektisches Weichlot Weichlot spezieller Zusammensetzung derart, daß die beteiligten Elemente (z.B. Zinn, Blei und Silber) sich zum einen nicht vermischen und zum anderen beim Erstarren ihrer Schmelze die einzelnen Komponenten nacheinander kristallisieren und so Gefüge verschiedener Erscheinungsformen annehmen

Elektromigration Durch Wanderung von Elektronen bedingte Materialschädigung

FEM Finite-Elemente-Methode, computerorientiertes numerisches Verfahren zur Ermittlung von Verformungen, mechanischen Spannungen, Drehungen usw. an komplizierten, analytisch nicht berechenbaren belasteten Bauteilen. Hierbei wird das Bauteil gedanklich durch ein idealisiertes Modell aus finiten Elementen ersetzt, d.h. aus einfachen Bauelementen wie Stäben, Dreiecks- und Viereckselementen, u.a., deren mechanisches Verhalten mathematisch formulierbar ist. Die FEM wurde ursprünglich für den Flugzeugbau entwickelt und wird heute im gesamten ingenieurtechnischen Bereich eingesetzt

Fillet Siehe *Solder-Fillet*

finite Elemente mit reduzierter Integration Spezielle Form der mathematischen Beschreibung eines finiten Elementes, die der schnelleren numerischen Auswertung dient

Freiheitsgrad Jede mögliche Bewegungsrichtung an den Knoten ist z.B. die Bewegungsmöglichkeiten in die x, y und z Koordinatenrichtungen, sowie die Verdrehungsmöglichkeiten um die Koordinatenachsen x,y und z herum

homologe Temperatur Die homologe Temperatur eines Materials erhält man, indem man die betrachteten Temperaturen des Materials, in Kelvin angegeben, auf seine Schmelztemperatur bezieht (T/T_S).

Hookesches Gesetz Linear-elastisches Materialmodell: $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Es werden nur die elastischen Materialeigenschaften berücksichtigt, und diese gehen auch nur linear in das Modell ein

intermetallische Phasen Gegenüber den aus der Chemie bekannten Bindungsarten (heteropolar, kovalent) überwiegt bei metallischen Verbindungen, die als intermetallische Phasen bezeichnet werden, die metallische Bindung, z.B. von Kupfer: Cu_6Sn_5

kalte Lötverbindung Lötverbindung, die herstellungsbedingt schlechte elektrische Eigenschaften aufweist

Knoten Die Punkte des finiten Elementes, mit deren Hilfe sein mechanisches Verhalten mathematisch beschrieben wird

Kriechgesetz Mathematische Beschreibung des Kriechverhaltens eines Materials. Das Kriechen wird z.B. durch die Dehnungsänderung im Verlauf der Zeit $\dot{\epsilon}$ charakterisiert und im Fall der sinus hyperbolikus Repräsentation $\dot{\epsilon} = A (\sinh B\sigma)^n (d)^m \exp(-Q/RT)$ in Abhängigkeit von der mechanischen Spannung σ , der thermischen Aktivierungsenergie $\exp(-Q/RT)$ und der Korngröße der Legierung d beschrieben

Lotkehle Geometrischer Bereich der Lötverbindung unter dem Bauteil, der wie eine Kehle ausgeformt ist

Lötpad Lötlandfläche, meist kupferne Fläche auf dem PCB; Leiterplattenseitiger Endpunkt einer Lötverbindung

power law Der funktionale Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Größe wird durch eine Summe von Potenzen hergestellt

Schubgleitung Tangentialkomponente der Dehnung, bei kleinen Deformationen als Winkeänderung interpretierbar

Schubspannung Tangentialkomponente der Spannung

Solder-Fillet Kurz Fillet, der geometrische Bereich des Lotes, der sich seitlich der SMC-Kappe bis hin zum Lötpad erstreckt und die Masse des Lotes einer Lötverbindung ausmacht

Standhöhe Standoff height, Abstand zwischen PCB und SMC

Thermozyklus Sich zyklisch wiederholende Temperaturbelastung

Tieftemperatkriechen In der Regel Kriechen bei Temperaturen unter 0,5 auf der homologen Temperaturskala des betrachteten Materials

Vergleichsdehnung Durch mathematische Reduktion eines räumlichen Dehnungszustandes auf eine Größe, die Vergleichsdehnung, wird der Vergleich dieses (komplexen) Dehnungszustandes mit einem einachsigen Dehnungszustand ermöglicht²⁹.

Vergleichsspannung Durch mathematische Reduktion eines räumlichen Spannungszustandes auf eine Größe, die Vergleichsspannung, wird der Vergleich dieses (komplexen) Spannungszustandes mit einem einachsigen Spannungszustand ermöglicht³⁰.

Verfestigung, mechanische Z.B. $\lambda = 0,1$ siehe Dehnungsverfestigung

zeitraffende Experimente Interpolation eines möglichst kurzen Test-Zeitintervall auf ein praxisrelevantes langes Zeitintervall z.B. 10 Jahre. Gängige Techniken sind z.B.: Durchführung der Test bei erhöhter Temperatur oder/und bei erhöhter Lastfrequenz im Vergleich zur Praxis

²⁹siehe z.B. auch in den Lehrbüchern [48, 52, 53]

³⁰siehe z.B. auch in den Lehrbüchern [48, 52, 53]

Literatur

- [1] M. Auray, P. Catherine, and J. Joly. Solder joints reliability of surface mounted components: a requirement for new quality insurance procedures. In *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, IEEE Cat. No. 88CH2629-4, pages 125–128. BULL, Les Clayes Sous Bois, France, June 1988.
- [2] H. S. Avery. Discussion of cyclic temperature acceleration of strain in heat-resisting alloys. In *Trans. Am. Soc. Metals*, volume 30, pages 1130–1133, 1942.
- [3] Alessandro Birolini. *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, Theorie, Praxis, Management*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985.
- [4] Alessandro Birolini. *Quality and reliability of technical systems theory, practice and management*. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [5] Alessandro Birolini. Reliability analysis techniques for electronic equipment and systems. In German Welding Society, editor, *EuPac '96*, volume 173, pages 99–105. ETH Zürich/CH, DVS, February 1996.
- [6] Gretchen A. Bivens. Predicting time-to-failure using finite element analysis. In *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pages 319–322. Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY., 1990.
- [7] J. L. Chaboche and J. Lemaitre. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press, 1990.
- [8] Harry K. Jr. Charles and G. V. Clatterbaugh. Solder joint reliability — design implications from finite element modeling and experimental testing. *ASME: Journal of Electronic Packaging*, 112(2):135–146, Jun 1990.
- [9] Robert Darveaux. Constitutive relations for tin-based solder joints. *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 15(6):1013–1024, Dez 1992.
- [10] DIN 40046: Umweltprüfung für die Elektrotechnik, verschiedene Teile und Blätter. Technical report, DIN, ab 1968.
- [11] B. D. Dunn. The properties of near-eutectic tin/lead solder alloys tested between +70 and -60 °C and the use of such alloys in spacecraft electronics. *ESTEC: Technical memorandum, European Space Research and Technologie Centre, Nordwijk, Netherlands, ESA, ?(ESA TM-162(ESTEC)):10*, Sep 1975.
- [12] Werner Engelmaier. Surface mount solder attachment reliability: Issues, design, testing, prediction. In *Technologieforum: 'Zuverlässigkeit von Surface Mount-Lötverbindungen'*, März 1993.
- [13] Werner Engelmaier. Surface mount solder attachment reliability: Issues, design, testing, prediction. In *Technologieforum: 'Zuverlässigkeit von Surface Mount-Lötverbindungen'*, Herbst 1994.
- [14] Neal F. Enke, Thomas J. Kilinski, Scott A. Schroeder, and Jon R. Lesniak. Mechanical behaviors of 60/40 tin-lead solder lap joints. In *IEEE/ECC: Proceedings of the Electronic Components Conference*, volume 0569-5503/89/0264, pages 264–272. Department of Engineering Mechanics, University of Wisconsin Madison, USA, 22–24 Mai 1989.

- [15] F. D. Fischer. Schädigungsmechanik — ein modernes Konzept zur Beurteilung des Bruchverhaltens. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, pages 524–534, 1987.
- [16] D. Grivas, K. L. Murty, and J. W. Jr. Morris. Deformation of pb-sn eutectic alloys at relatively high strain rates. *Acta Metallurgica*, 27:713–737, 1979.
- [17] Michael Harning, Andreas Warnke, and Uwe Schomburg. Bewertung der Schaedigungsentwicklung von Lötstellenelektronischer Leiterplatten. In DVS, editor, *Magdeburg, 26. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises "Bruchvorgänge" mit dem Themenschwerpunkt: Fehlererkennung und Fehlerbewertung*, volume 26, pages 13,22–23, February 1994.
- [18] C. A. Harper. *Handbook of Materials and Processes of Electronics*. Mc Graw-Hill, New York, 1970.
- [19] Hartmann Hieber. Fatigue of soft-soldered contacts at surface-mounted devices. *Annual Proc - IEEE/Reliability Physics (Symp)*, cat n 88CH2508-0:234–238, Apr 1988.
- [20] Wilhelm Hofmann. *Blei und Bleilegierungen*. Springer-Verlag Berlin/Goettingen/Heidelberg, 2 edition, 1962.
- [21] E. Hornbogen and H. Warlimont. *Metallkunde*. Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 2 edition, 1991.
- [22] J. Hoyt. Influence of leg shape and solder joint metallurgy on surface mount solder joint strength. *Brazing & Soldering*, (13):10–19, Autumn 1987.
- [23] HÜTTE *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong, 29 edition, 1989.
- [24] Jennie S. Hwang. Chanllenges in modeling solder joint life prediction. *SMT*, pages 20–22, December 1995.
- [25] Basic environmental testing procedures for electronic components and electronic equipment, - part i: General, -part ii: Tests. Technical report, IEC, 1968.
- [26] Solder alloy data: Mechanical properties of solders and soldered joints. Publication 656, ITRI: International Tin Research Institute, Fall 1986.
- [27] John H. Lau. A note on the calculation of thermal stresses in electronic packaging by finite element methods. *ASME: Journal of Electronic Packaging, Technical Briefs*, 111(4):313–320, Dec 1989.
- [28] John H. Lau. Thermal stress analysis of smt pqfp packages and interconnections. In *ASME: Journal of Electronic Packaging siehe auch ASME paper 88-WA/EEP-9 im Nov. 1988*, volume 111, pages 2–8, Mar 1989.
- [29] John H. Lau and G. Harkins. Thermal stress analysis of soic packages and interconnections. In *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, volume 11, pages 380–389, Dec 1988.
- [30] John H. Lau and G. Harkins. Thermal stress analysis of soic packages and interconnections. In *IEEE/ECC: Proceedings of the Electronic Components Conference IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, volume 11, pages 23–31, Dec 1988.

-
- [31] John H. Lau, Laura Powers, Jim Baker, Don Rice, and Bob Shaw. Solder joint reliability of fine pitch surface mount technology assemblies. In *IEEE/ IEMT; T-CHMT Sept 90*, volume CH2720-1/89/0000-0048, pages 48–60. HP, San Jose, CA, USA, 1989.
 - [32] John H. Lau and D. Rice. Failure analysis of surface mounted interconnection. In *Proceedings of ASM's 12th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pages 73–82, Los Angeles, CA, Oct 1986.
 - [33] John H. Lau and Donald W. Rice. Effects of standoff height on solder joint fatigue. In USA: Cahners Exposition Group 1986 Des Plaines, IL, editor, *Proceedings of the Technical Program of the National Electronic Packaging and Production Conference - NEPCON WEST: Packing, Production, Testing*, volume 1, pages 437–454. Manuf. Res. Center, Hewlett-Packard Labs., 25–27 Feb 1986.
 - [34] John H. Lau, Donald W. Rice, and Phil A. Avery. Elasto-plastic analysis of surface-mount solder joints. In *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, volume 10(3), pages 346–357, Sep 1987.
 - [35] C. A. MacKay. A stress driven diffusion mechanism to explain cyclic degradation of surface mount joints. *Brazing & Soldering*, (13):57–58, Autumn 1987.
 - [36] S. S. Manson. *Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue*. McGraw-Hill, New York, 1966.
 - [37] B. Michel, R. Dudek, A. Schubert, and W. Faust. Werkstoffmechanische Untersuchungen an Lötstellen in mikrotechnischen Aufbauten. In *DVS Berichte*, volume 182, pages 223–233. DVS.
 - [38] Mil-std-
 - 202: Test methods for electronic and electrical component part. aufl.f, 1980,
 - 750: Test methods for semiconductor devices. aufl.c, 1983,
 - 810: Environmental test methods and engineering guidelines. aufl.d, 1983
 - 883: Test methods and procedures for microelectronics. aufl.c, 1983. Technical report, MIL, 1980/83.
 - [39] J. Morrow and F. F. Martin N. E. Dowling. Local stress-strain approach to cumulative fatigue damage analysis. Final Report T & A. M. Report No. 379, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, Urbana, Jan 1974.
 - [40] Tsung-Yu Pan, Y. Tong, and H. U. Akay. A finite element study of fatigue life prediction methods for thermally loaded solder joints. *ASME: Advances in Electronic Packaging*, 4(2):1063–1070, 1993.
 - [41] Christian Pätz. Experimentelle Ermittlung mechanischer Materialkennwerte des Weichlotes Sn62Pb36Ag2 für die SMD- Verbindungstechnik von Leiterplatten. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr, Hamburg, September 1992.
 - [42] N. Paydar. Thermal cycling induced plastic deformation in solder joints — part i: Accumulated deformation in surface mount joints. *ASME: Journal of Electronic Packaging*, 113(1):8–15, Mar 1991.
 - [43] N. Paydar, Y. Tong, and H.U. Akay. A finite element study of fatigue life prediction methods for thermally loaded solder joints. *ASME: EEP, Advances in Electronic Packaging*, 4(2):1063–1070, 1993.

- [44] N. Paydar, Y. Tong, and H.U. Akay. A finite element study of factors affecting fatigue life of solder joints. *ASME: Journal of Electronic Packaging*, 116:265–273, Dec 1994.
- [45] Ray Prasad, Vern Solberg, Jennie S. Hwang, and Ken Gilleo. Stepping out. *SMT*, (3):1–48, Mrz 1994.
- [46] Barrie S. H. Royce. Differential thermal expansion in microelectronic systems. In *I-THERM, siehe auch IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology.*, volume 88CH2590-8/88/0000-0171 oder 11, pages 171–180 oder 454–463. Applied Physics and Materials Laboratory, Princeton University, NJ, USA, 11–13 May oder Dec 1988.
- [47] V. Sarhan. Temperature dependent viscoplastic simulation of controlled collapse solder joint under thermal cycling. In *Transactions of the ASME*, volume 115, pages 16–21. Advanced Packaging Development Center, Motorola, Inc., Phoenix, Mrz 1993.
- [48] W. Schnell, D. Gross, and W. Hauger. *Technische Mechanik, Bd. 2: Elastostatik*. Springer Verlag, Heidelberger Taschenbücher Band 216, 1987.
- [49] Ifran Sharif, Donald B. Barker, Abhijit Dasgupta, and Michael G. Pecht. Fatigue analysis of a planarpak surface mount component. In *90-WA/EEP-4*, pages 1–8, Winter Annual Meeting, Dallas, Texas, 25.–30. Nov 1990. CALCE Center for Electronics Packaging, University of Maryland, ASME.
- [50] H. S. Solomon, V. Brzozowski, and D. G. Thompson. Prediction of solder joint fatigue life. Interim rept. AD-A204 335/4/XAD; 88CRD101; AFWAL-TR-89-4002, Martin Marietta Corp, Orlando, FL. Air Force Wright Aeronautical Labs., Wright-Patterson AFB, Apr 1988.
- [51] Tim Sullivan, Jehuda Rosenberg, and Shiro Matsuoka. Photoelastic and numerical investigation of thermally-induced restrained shrinkage stresses in plastics. In *I-THERM*, volume 88CH2590/88/0000-0060, pages 60–66. AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA, 11–13 May 1988.
- [52] Istvan Szabó. *Einführung in die Technische Mechanik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- [53] Istvan Szabó. *Höhere Technische Mechanik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- [54] C. J. Thwaites. *Soft-Soldering Handbook*. ITRI: International Tin Research Institute, Jan/Oct 1982/1982.
- [55] J. K. Tien, B. C. Hendrix, and A. I. Attarwala. Understanding the cyclic mechanical behavior of lead/tin solder. *ASME: Journal of Electronic Packaging*, pages 115–120, Jun 1991.
- [56] D. Tribula, D. Grivas, R. D. Frear, and J. W. Jr. Morris. Observations on the mechanisms of fatigue in eutectic pb-sn solder joints. In *ASME winter annual meeting, Chicago, IL, USA*, number ASME Paper No 88/WAM/EEP-13, pages 83–89. Lawrence Berkeley Lab., CA. Sponsor: Department of Energy, Washington, DC, 28. Nov 1988.

- [57] Andreas Warnke, Michael Harning, and Uwe Schomburg. Inelastische temperaturabhängige Ermüdung von Lötstellen oberflächenmontierter Komponenten. In DVS, editor, *DVS Berichte: Weichlöten in Forschung und Praxis*, volume 153, pages 140–148, February 1993.
- [58] Andreas Warnke, Uwe Schomburg, and Michael Harning. Lebensdauerabschätzung von Lötstellen oberflächenmontierter Bauteile unter Berücksichtigung der Bedeutung elastischer, plastischer und Kriechdehnungsanteile bei thermischer Wechselbeanspruchung. In DVS, editor, *DVS Berichte: EuPac '94*, volume 158, page 26, February 1994.
- [59] S. Wege. Verhalten von Lötverbindungen unter Vibrationsbelastung. In *Proceedings of Conference Weichlöten in Forschung und Praxis*, number 104 in DVS Berichte, page 134ff, Feb 1986.
- [60] Sonja Wege. Untersuchung des Einflusses von Lotwerkstoff und Bauelementform auf das Temperaturwechsel- und Vibrationsverhalten von Lötverbindungen. Dissertation, München, Techn. Univ., 1986.
- [61] Sonja Wege. Alterungsverhalten von Lötstellen. Abschlussbericht einer wissenschaftlichen Untersuchung, TU München, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1992.
- [62] Michael J. Whalen. Accelerated life tests of a compliant lead design for lcc's. In *SMART V*, volume Technical Paper: SMT V-47A, pages 1–21, 9–12 Jan 1989.
- [63] Bob Willis. step-by-step smt — soldering. *smt*, pages 110–114, August 1996.
- [64] Boon Wong, D. E. Helling, and R. W. Clark. A creep-rupture model for two-phase eutectic solders. *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 11(3):284–290, Sep 1988.
- [65] Akio Ysaikawa. A new index s for evaluating solder joint thermal fatigue strength. In *IEEE/CHMT: Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, volume 13(4), pages 1146–1153, Dec 1990.

12 Lebenslauf

17.09.1961	geboren in Hamburg
Seit August 1991	verheiratet mit der Ärztin Claudia Warnke aus Hamburg geb. Flügge aus Hamburg 2 Kinder
1968 - 1972	Grundschule Heidberg in Norderstedt
1972 - 1973	Copernicus Gymnasium
1973 - 1978	Realschule Garstedt
1978 - 1981	Fachgymnasium der Beruflichen Schulen des Kreises Bad Segeberg in Norderstedt, Technischer Zweig, mit dem Abschluß der Allgemeinen Hochschulreife
1980 - 1981	Gründung einer Computer-Arbeitsgemeinschaft am Fachgymnasium sowie Halten einer Vortragsreihe über Rechneraufbau und Programmierung
7/1981 - 9/1982	Wehrdienst
10/1982 - 8/1988	Studium der Mathematik, Nebenfach Physik, mit Abschluß Diplom an der Universität Hamburg
1986 - 1988	Erstellung von Software zum Thema <i>Kurven und Flächen im CAD</i> und Betreuung sowie Anleitung von Ingenieuren im vernetzten Computer-Pool als studentische Hilfskraft und Tutor
1988 - 1993	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Technische Mechanik am Fachbereich Elektrotechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg, betraut mit verschiedenen Aufgaben in Lehre und Forschung
seit 1991	Mentor für die Fernuniversität Hagen: Durchführung von Präsenzveranstaltungen und Klausurvorbereitungen für die Fachbereiche Mathematik und Informatik sowie für Technische Mechanik
1994 - 1996	Softwareengineer bei der Firma Pergamon GmbH: Leitung des Projektes <i>automatische Datenverarbeitung in der Bausparkasse</i>
Seit 1996	Systementwickler und Projektmitarbeiter/-leiter bei der ENATOR Nord GmbH: Verschiedene Projekte im Client-/Server und HOST Umfeld für Kunden aus den Branchen Banken, Pharmazeutische Industrie und Touristik